

Proyecto final de grado

Ingeniería industrial

Diseño de Controladores de Motores para Aplicaciones de Motion Control

MEMORIA

Autor: Daniel Saiz Setién
Director: Vicenç Puig Cayuela

En colaboración con **INGENIA MOTION CONTROL.**

17 de Enero de 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Abstract

Cuando nació la teoría de control, las aplicaciones (y los medios para implementarlas) eran completamente distintas a las que conocemos.

El panorama ha evolucionado tanto por lo que hace referencia al diseño como la estructura e implementación de los controladores. Así de los primeros controladores de avance y retardo de fase se pasó a los más avanzados basados en la electrónica analógica como PID, I-PD y más recientemente a las versiones digitales de estos. [3], [10], [5], [7].

Los avances dentro del mundo digital, la teoría de control discreto y la creciente capacidad de computo de los procesadores han conseguido llegar a un punto en el que un algoritmo es capaz de realizar los análisis, modelado y verificación del sistema y un diseño y sintonizado del control apropiado, todo ello de forma autónoma y sin que el usuario de dichos controles requiera de conocimientos sobre control muy avanzados para poder configurar un sistema de control. Este es el objetivo del software **IngeniaWizard** desarrollado por la empresa **Ingenia Motion Control** y capaz de realizar todas las funciones descritas anteriormente.

El objeto del proyecto radica en un análisis y comprensión la versión actual del **IngeniaWizard** de cara a implementar una nueva versión del *software* **MotionLab** a partir del resultado del estudio de las debilidades que presenta y tiene como alcance la mejora y corrección de las mismas.

El *software* **MotionLab** permite identificación del sistema (máquina eléctrica a nivel eléctrico y mecánico), diseño y sintonizado del control y posterior verificación del sistema de control.

Indice de contenidos

Abstract	3
Nomenclatura	6
1 Introducción	8
1.1 Contexto: proyecto SMART	9
1.2 Objetivos	9
1.3 Alcance	10
1.4 Notas sobre la evolución del proyecto	11
2 Software MOTIONLAB	13
2.1 Lazos de control	16
2.2 Entorno de pruebas y componentes usados	17
2.2.1 Controladores	18
2.2.2 Motor de pruebas	19
2.3 Variables de medida del equipo	19
2.3.1 Sensores	19
2.3.2 Registros	20
3 Modelado del sistema	21
3.1 Modelo eléctrico	21
3.2 Modelo mecánico	23
3.3 Modelo de identificación	24
4 Identificación del modelo	25
4.1 Secuencia del algoritmo de identificación y sintonizado	25
4.2 Señal de control	26
4.2.1 Comparación de métodos de optimización	27
4.2.2 Optimización de fase Newman	28
4.2.3 Análisis de la relación señal ruido	29
4.2.4 Análisis de la respuesta temporal de un sistema ante un multiseno	31
4.3 Consideraciones del dominio temporal y frecuencial	32
4.4 Consideraciones de precisión y exactitud	33
4.5 Identificación del modelo eléctrico	34

4.5.1	Bloqueo del rotor, eliminación de la fuerza contraelectromotriz	34
4.5.2	Método de análisis	34
4.5.3	Verificación del modelo eléctrico	35
4.6	Condiciones destructivas del algoritmo	39
5	Diseño del control	41
5.1	Fijación de especificaciones	41
5.2	Sintonizado del control de flujo y torque	42
5.3	Soluciones previas	43
5.4	Nuevo planteamiento de sintonizado del control	43
5.5	Notas sobre el control	44
6	Herramientas <i>software</i>	45
6.1	Análisis del algoritmo de identificación previo	45
6.2	Estructura de las herramientas desarrolladas	46
6.3	Signal Generator	47
6.4	Signal Capture	48
6.5	Análisis temporal	48
6.6	Análisis frecuencial	49
6.7	Utilidades adicionales	50
7	Estudio económico	51
7	Estudio de impacto ambiental	53
8	Trabajos futuros	54
9	Conclusiones	55
	Agradecimientos	58

Nomenclatura

A continuación se describen algunas conceptos que se utilizan a lo largo de la memoria del proyecto:

Sistema: es cualquier elemento cuyo comportamiento relacione como mínimo una variable o magnitud de entrada con una de salida, relación que puede ser constante o variante en el tiempo.

En el alcance de este proyecto sólo se estudian sistemas lineales e invariantes en el tiempo.

Controlador: En la teoría de control, habitualmente se denomina controlador a la ley de control descrita mediante las acciones matemáticas que describen su comportamiento.

A lo largo del presente documento se refiere a ley de control como **control** o **estructura de control**, quedando reservada la denominación **controlador** para el sistema completo de control, que engloba la electrónica, mecánica, lógica y programación del mismo.

Reloj: en un sistema discreto real, el reloj es el circuito que se encarga de marcar la unidad de tiempo dentro del sistema.

A lo largo de este estudio se considera un reloj ideal que fija una unidad de tiempo ($T_s [s]$) constante e invariable.

Registro: en un sistema electrónico (o digital), se trata de bloques de memoria reescribibles a voluntad.

Permiten almacenar información y están caracterizados por la capacidad y el formato de la información que aceptan.

Por sus análogos, más internacionalmente usados, provenientes de la literatura inglesa:

Servo, servodrive: comúnmente traducido como servocontrolador, o en este documento referido como **controlador**.

Hardware (soporte físico): elementos físicos, generalmente analizados por su comportamiento mecánico, térmico o eléctrico.

Firmware (soporte lógico): dentro la parte hardware, se separa aquella orientada a crear una estructura lógica dentro de la electrónica del sistema.

Se programan algoritmos y sistemas de estados que se diseñan y ejecutan al nivel más bajo (es habitual trabajar con palabras y alfabetos binarios directamente, donde la información se interpreta al nivel más básico, que es con lo que trabaja la electrónica).

Software: es la parte de programación lógica de alto nivel. Aquí se hace uso de funciones y estructuras programadas dentro del firmware dando uso a su función sin necesidad de preocuparse de su implementación.

Acostumbran a tratar aspectos de interacción externa con el sistema o interacción del sistema con el usuario.

Encoder: codificador, aquí referido a sensores físicos. Elemento encargado de traducir o convertir información de magnitudes físicas distintas.

Planta: Cuando se refiera a planta, se entiende el sistema externo al cual se conecta el controlador.

Aquí se puede distinguir:

- Sistema motor: es el sistema actuador y núcleo principal del sistema completo de control.
- Sensores y/o adaptadores: no forman parte del sistema motor pero son necesarios para observar el estado del sistema motor.

Si bien no son necesarios desde el punto de vista teórico, en un mundo práctico son generalmente necesarios.

Debido a que van a formar parte inherente del sistema planta, en el estudio se modelan de forma conjunta con la planta y esta distinción que hago aquí queda camuflada por un bloque más grande que los engloba.

En el Anexo III se estudia como la naturaleza de estos elementos de interconexión puede influir en el modelo y dominio de trabajo de la planta.

En estos casos si que hay que realizar un estudio previo de estos elementos por separado antes de meterlos en el bloque planta.

1 Introducción

La empresa **Ingenia MotionControl** se dedica desde 2006 al diseño, fabricación e implementación de controladores digitales (*Servo Drives*, tal y como se denominan internamente) para motores de un amplio rango de topologías y tipologías, con aplicaciones tan diversas como control de maquinaria, robótica aplicada o motores eléctricos para vehículos.

A lo largo de su desarrollo como empresa, detectaron un aspecto muy interesante de los controladores digitales que permite realizar una puesta a punto del sistema de control de forma automática.

En colaboración con el **Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAII)** se han llevado a cabo dos proyectos finales de grado y master que constituyen la base de estudio e implementación de algoritmos de identificación de sistemas y sintonizado automático de controladores [1], [9]. En estos trabajos se analizan aspectos como el tipo de señal y método usado para la identificación. Además se realiza un profundo estudio sobre la implementación de distintas arquitecturas de control.

En el momento que comencé este proyecto, acudí al Departamento ESAII con varias propuestas de proyecto, a las cuales SEme ofreció una alternativa muy interesante que, además, estaba muy en la línea de las propuestas que yo le había expuesto: implementar el sistema de identificación y auto-sintonizado de sistemas en la nueva gama de producto que la empresa **Ingenia MC** estaba desarrollando.

Dedicado por afición al mundo de la electrónica y sonido, ya contaba con experiencia en ingeniería de sistemas de audio, había experimentado con tratamiento de señales y diseño sonoro, también con análisis y afinado de sistemas de sonido, así que la propuesta de aplicar estos conocimientos a un proyecto en curso con una exigencia técnica y pragmática elevada me llamó la atención desde el primer momento.

Tras una reunión con los responsables del proyecto en **Ingenia**, Francesc Marlasca y Roger Juanpere, acordamos las bases del proyecto y objetivos que se pretendían cubrir.

Y nos lanzamos al trabajo,

1.1 Contexto: proyecto SMART

Para comenzar, se definen de forma clara tanto el alcance y duración del proyecto como los puntos clave u objetivos que se pretenden cubrir con el presente estudio.

La base de todo el proyecto gira en torno a la implementación de todo cuanto se desarrolle.

El proyecto se denomina **SMART**. Engloba la implementación de la identificación y sintonización automática en los controladores de **Ingenia**, basándose en el trabajo de investigación anteriormente realizado y en la implementación actual.

Adicionalmente incluye un desarrollo de algoritmos de mantenimiento predictivo llevado a cabo por el Prof. Joaquim Blesa del Departamento ESAIL.

Este proyecto ha sido supervisado desde el **Instituto de Robótica Industrial** por Vicenç Puig y desde **Ingenia MC** por Roger Juanpere, Francesc Marlasca y Oriol Burgaya.

1.2 Objetivos

Los objetivos y plan de trabajo los fija **Ingenia** en base a los problemas actuales más recurrentes del software **MotionLab** y son los siguientes:

1. Revisión de la identificación y sintonizado actual.
 - Propuestas de mejora.
2. Las sintonías de los controladores acostumbran a ser muy agresivos y pocos estables. Siempre es necesario un poco de afinado manual posteriormente.
 - Validar el auto-sintonizado actual. Asegurar que las especificaciones que introduce el cliente son las que se obtienen tras el sintonizado automático.
3. La identificación de la inductancia en motores de baja inductancia es poco precisa (Ej: Portescap).
4. El auto-sintonizado con carga no es fiable.
 - Punto para experimentar e implementar.
5. Dependiendo del motor y del controlador, el motor se puede mover de forma considerable durante la auto-configuración.
 - Evitarlo si es posible o crear un aviso en caso de que vaya a suceder durante la configuración.
 - Identificación en lazo cerrado. La identificación actual se realiza en lazo abierto.

6. Según la inductancia/resistencia del motor, el algoritmo que gestiona el "duty cycle" puede crear sobrecorrientes, en muchos casos con carácter destructivo para el controlador y/o el motor.

- ¿Cual es la tensión óptima para realizar la identificación?

Todos estos objetivos quedan englobados en uno principal que es el desarrollo e implementación del algoritmo de identificación y auto-sintonizado **IngeniaWizard** en el lenguaje de programación *Python*.

1.3 Alcance

El alcance del proyecto lo fijamos desde el **Departamento de Robótica y Control Automático**.

Se realiza una planificación debidamente dividida y estructurada que se puede ver en el Anexo VIII.

Como estructura principal del proyecto se plantea analizar y responder a los objetivos fijados.

Adicionalmente el proyecto **SMART** tiene un plan de trabajo preliminar que también se puede ver en los Anexos de esta memoria, en el que se detallan las bases del proyecto y el alcance que se planteaba inicialmente. Como las condiciones en las que se desarrolla el proyecto no son las mismas que planteaba el anteproyecto, se tienen en cuenta estos objetivos sin ser prioritarios respecto a los establecidos en la reunión con los responsables de proyecto de **Ingenia MC**.

Durante el proyecto se analizan y redirigen algunos de los puntos establecidos a continuación debido a las condiciones en las que evoluciona el proyecto. Se menciona al final de esta sección:

1. Se planifica analizar el software actual, verificar que los conceptos aplicados son correctos y estudiar los puntos de mayor ambigüedad para fortalecer el funcionamiento del mismo.
Se plantea introducir la identificación en lazo cerrado si procede (relacionado con el punto 4 y 5).
2. El problema principal radica en que, debido a la forma de diseño y el tipo de control usado, una parte del sistema no se fija con las especificaciones (en concreto la parte de los ceros que aparecen en el denominador, revisado en el Anexo IV).
Para solventar este problema se plantean estructuras de control alternativas y la posibilidad de realizar una simulación del sistema final más fidedigno al resultado que se va a obtener. Se estudia en el capítulo 5.
3. Este problema deriva de aspectos eléctrico/mecánicos del motor. La baja inductancia propicia que los parámetros eléctricos del motor (y derivado de esto, los parámetros

mecánicos) tengan una constante de tiempo muy pequeña (son muy rápidos), en consecuencia, a la hora de realizar la identificación, es muy fácil que el rotor se mueva con los problemas que esto conlleva. Se estudia en profundidad en el capítulo 3. Las acciones que se tomarán para este punto son principalmente:

- Análisis de la señal de inyección y los aspectos que afecten a este problema.
 - Análisis del método de inyección y enfoques que permitan reducir este efecto.
4. La definición de este punto es un tanto ambigua y se adoptan dos posibles enfoques:
- La identificación con cargas elevadas presenta alguna debilidad. Revisar la influencia de la carga sobre la identificación.
 - El origen del problema es la variabilidad de la carga que se aplica al sistema. En este caso se debe actuar sobre el control mediante un estudio de robustez del control.
5. Este punto está relacionado con los puntos 1, 3 y 4. La solución más evidente es la identificación en lazo cerrado, aunque durante el proyecto (especialmente en lo que respecta al punto 3) se verá que existen alternativas mucho más eficientes.
6. Este punto es el menos prioritario y por ello no se establece una planificación para solucionarlo. A priori se trata de un tema de *hardware* y *firmware* que flaquean a la hora de determinar y limitar situaciones en las que el sistema está entrado en zonas de saturación (ya sea del motor o del controlador) y es incapaz de activar alguna medida de protección.
- A pesar de ello se estudia un aspecto interesante que influye directamente aquí y es el tipo de señal de entrada y amplitud aplicada (punto 1).

1.4 Notas sobre la evolución del proyecto

Aprovecho esta parte para definir la estrategia y evolución del proyecto a lo largo de su cronología.

Durante la implementación se detectó que había muchos factores que influían en el proceso de identificación realmente significativos, que están dando problemas al funcionamiento del algoritmo y que no se habían considerado en los estudios previos.

Como método de actuación se decide dar preferencia sobre el algoritmo de identificación. Se ve más tarde que la implementación del auto-sintonizado radica únicamente en el cálculo algebraico de una expresión que permita calcular los valores de las constantes de control a partir de los datos identificados.

Por esto, y a pesar de que se estudia ese aspecto en profundidad, no se ha realizado la validación del autosintonizado.

El cuerpo de este proyecto consiste entonces en desarrollar herramientas en forma de algoritmos que puedan ser usadas posteriormente para construir estructuras y algoritmos más complejos basados en los mismos.

2 *Software* MotionLab

El *software* **MotionLab** es una herramienta informática destinada a ofrecer una interacción con el usuario sencilla y amigable, al tiempo que permite a usuarios avanzados acceder a los parámetros de configuración más intrincados en la arquitectura del controlador (Fig. 2.1).

Algunas de sus principales funciones:

- Introducir los límites de operación del motor como voltaje, corriente y par motor nominal y máximo, aunque también parámetros que afectan al motor en particular, como las aceleraciones máximas permisibles (Fig. 2.2).
- Sintonización y configuración del sistema control y modo de operación. Permite establecer si se desea un control de velocidad, posición, par motor o una combinación de ellos.
Se pueden editar opciones como los sensores usados, frecuencia del lazo de control, filtros aplicados a las distintas señales y un conjunto muy amplio de parámetros.
- Comunicación: las opciones de comunicación son extensas y con muchas variables a configurar. Algunos de los modos de comunicación son: puerto serie (*USB*) o *EtherCat*
- Configuración de entradas y salidas físicas del controlador.
- Automatización de procedimientos, o inserción de algoritmos propios en el controlador.
- Sintonizado y puesta a punto automática (Fig 2.3). Es la parte que afecta a este estudio, ejecuta un algoritmo que configura de forma automática todos los parámetros del sistema de control para que el controlador pueda operar el motor de forma óptima, sin requerir que el usuario tenga conocimiento o experiencia en control de sistemas (Fig 2.4).

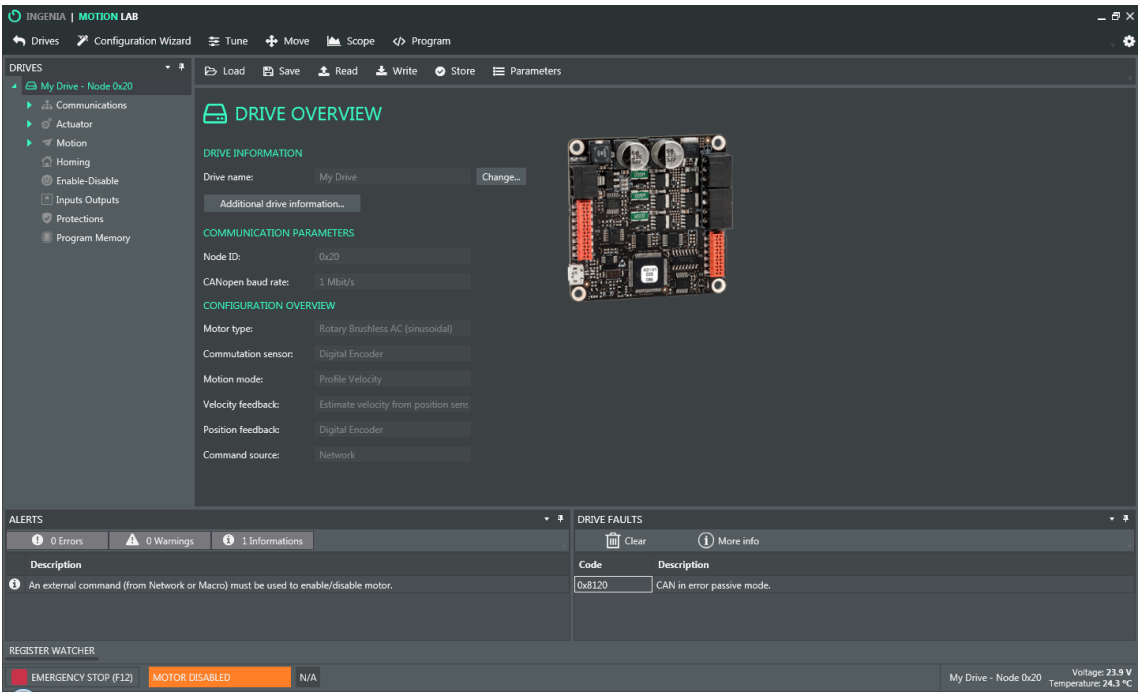


Fig. 2.1: Ventana principal MotionLab

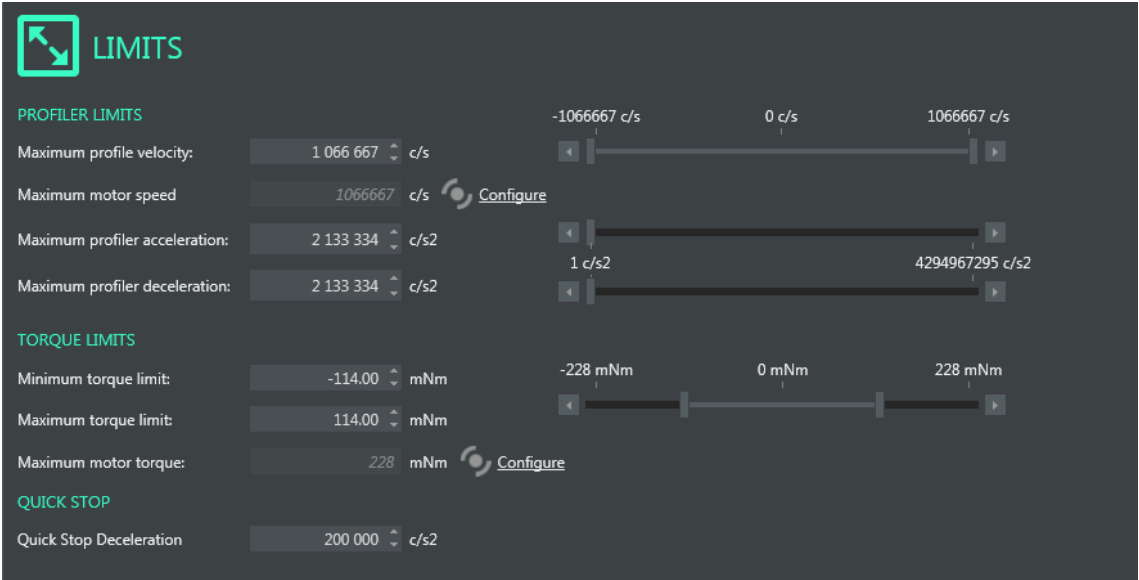


Fig. 2.2: Configuración límites MotionLab

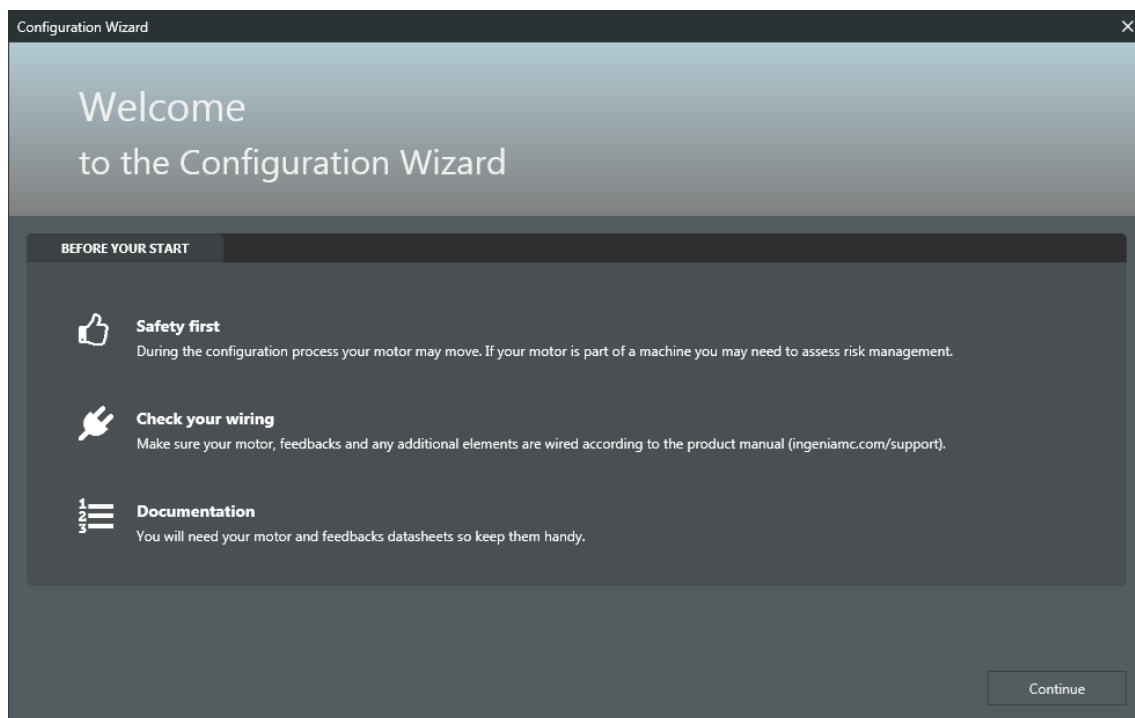


Fig. 2.3: IngenuWizard MotionLab

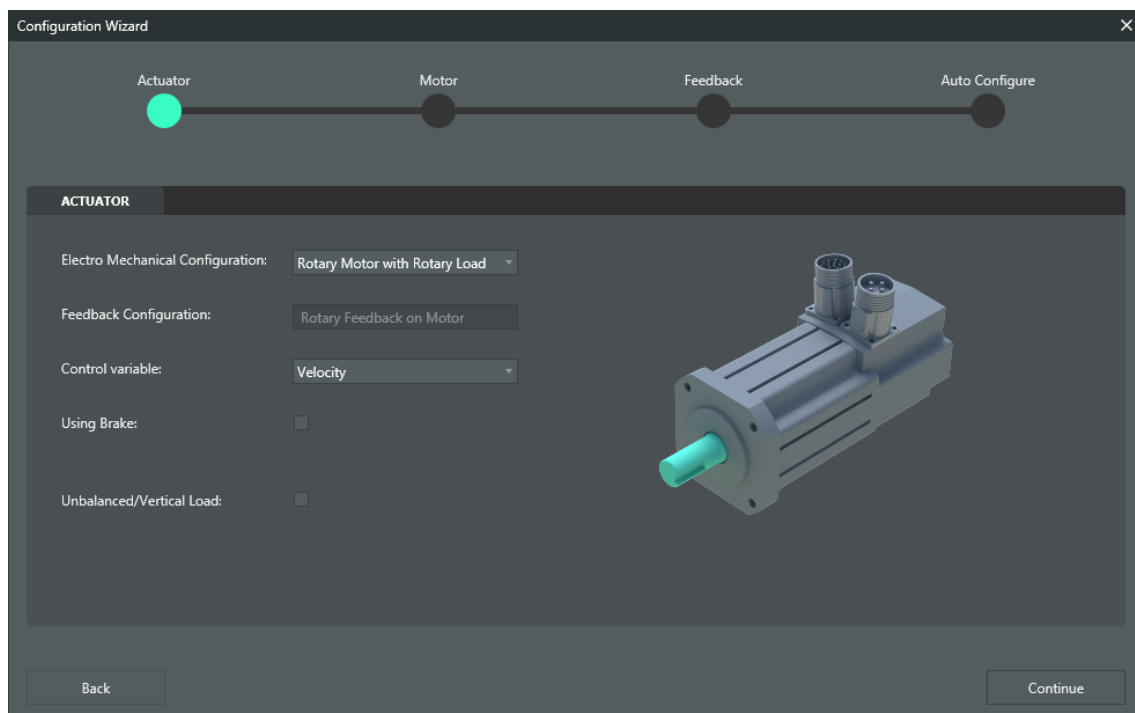


Fig. 2.4: IngenuWizard configuración MotionLab

2.1 Lazos de control

El lazo de control que usa Ingenia se basa en una señal de consigna establecida por el usuario que ataca a un *profiler*, del cual se pasa a un control de posición o velocidad (no se pueden controlar ambos de forma simultánea) y finalmente la consigna pasa al bloque de control de par motor (Fig. 2.5).

El *profiler* (o generador de perfiles) es un módulo que se encarga de corregir las discontinuidades en la consigna, suavizándolas mediante unos parámetros que establece el usuario (como por ejemplo, aceleración máxima, velocidad máxima, etc) de forma que no haya transiciones bruscas.

Junto con un módulo adicional, se encarga de vigilar que los límites de funcionamiento del sistema (intensidad y voltaje máximos) no sean sobrepasados.

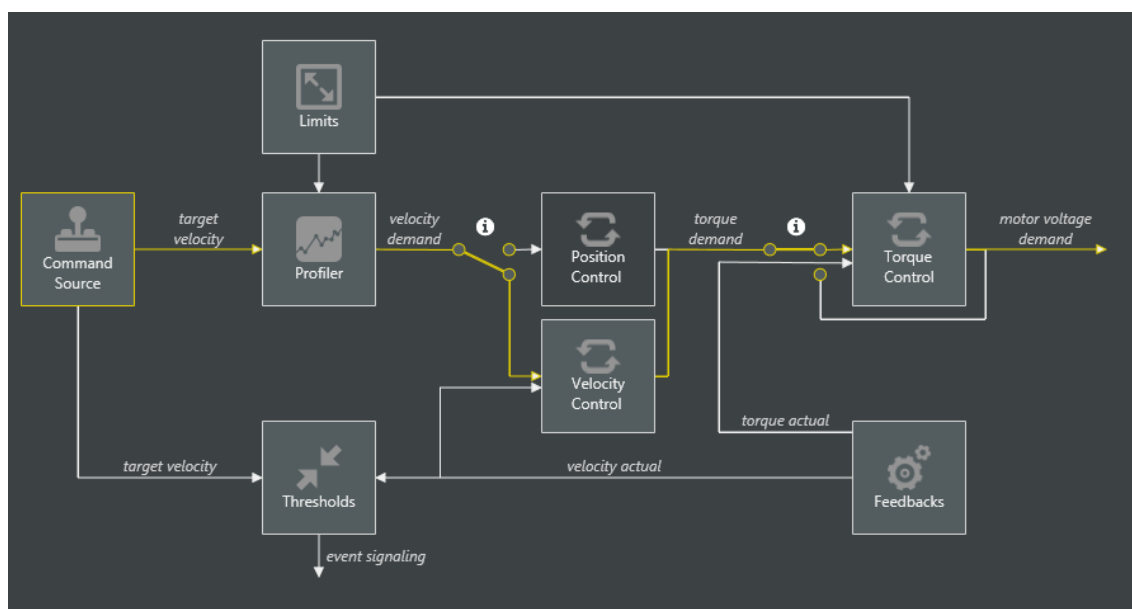


Fig. 2.5: IngeniaWizard Lazo de Control

El hecho de que el control de posición/velocidad no sea en cascada se debe a aspectos prácticos de la implementación (ver Anexo II).

Por otra parte, la estructura en cascada del control de posición/velocidad y el de par permite que se puedan establecer consignas separadas para velocidad/posición y par motor. Mientras se está siguiendo una trayectoria en el primer bloque (posición o velocidad), se asegura que los límites de par aplican a la trayectoria, siendo esto útil en caso de no linealidades que ocurren durante la operación del sistema (como por ejemplo, obstáculos, cargas imprevistas, etc).

2.2 Entorno de pruebas y componentes usados

A lo largo de la realización del proyecto se utiliza un amplio abanico de componentes para la prueba y verificación de los conceptos aplicados. En particular el banco de pruebas presentado en la Figura 2.6 junto con su fuente de alimentación mostrada en la Figura 2.7.

Se dispone de forma adicional, de acceso a las instalaciones de Ingenia: oficina, laboratorio, banco de pruebas con distintos tipos de motores, sensores y cargas ficticias e instrumentación diversa.

De la misma forma, todos los trabajadores y desarrolladores de Ingenia está disponibles para poder realizar cualquier consulta relativa a sus productos.

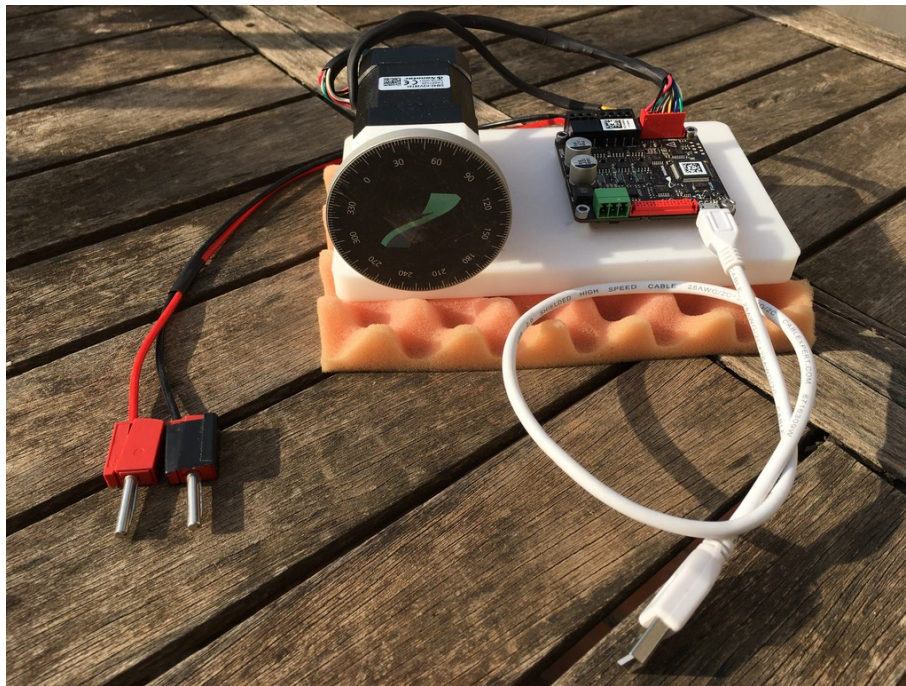


Fig. 2.6: Banco de pruebas



Fig. 2.7: Fuente de alimentación

2.2.1 Controladores

Los controladores son la pieza principal en torno a la cual gira el trabajo. Están constituidos (a muy grandes rasgos) por una serie de módulos que se enumeran a continuación:

Comunicación: la conexión entre los módulos internos y el mundo exterior al controlador.

Control: circuito lógico, básicamente un microprocesador en el que se implementan las acciones de control.

Potencia: la electrónica de potencia, reguladores de tensión y la parte más importante del controlador: el modulador o ondulator, encargado de traducir las señales de control al actuador mecánico (por medio del circuito eléctrico).

Protecciones: no se trata de un módulo concreto sino que más bien están distribuidas entre los módulos anteriores y se desarrollan a nivel de soporte físico y lógico.

Este trabajo se centra en el módulo de control, aunque se trabaja de forma muy cercana al módulo de potencia debido a las implicaciones de este sobre el control (Anexo II, capítulo refmodel).

2.2.2 Motor de pruebas

El motor usado es un motor síncrono de tres fases dispuestas en triángulo y dos parejas de polos, complementado por un *encoder* óptico absoluto integrado en la parte posterior del motor. Ambos componentes fabricados y distribuidos por **Nanotec**.

Toda la documentación necesaria figura de forma adjunta en el Anexo VII.

2.3 Variables de medida del equipo

La definición de las variables de medida se realiza cronológicamente después del modelado matemático, pero se lista aquí por formar parte del equipamiento.

2.3.1 Sensores

En cuanto a lo que al motor se refiere, se estudian dos grupos de sensores:

- Sensores Hall, integrados en el motor: habitualmente el motor dispone de 3 sensores de efecto Hall (ceranía de campo magnético), uniformemente repartidos en torno al rotor. El carácter de estos sensores es binario (activo o inactivo).

Las medidas extraídas de este conjunto de sensores permite obtener $pos_h = 2 * 3 = 6$ combinaciones posibles, obtenidas en forma de un código binario simple, que permiten conocer la posición del eje con una precisión de $360/pos_h = 60^\circ$.

El límite de operación de este sensor depende del diseño interno pero generalmente es muy superior al del rango de velocidades de operación de un motor.

- Encoder digital: el codificador expresa la posición en CPR (*counts per revolution* o cuentas por revolución).

Existen dos tipos:

Absoluto: tiene una referencia absoluta que permite determinar la posición exacta del rotor del motor.

Esta referencia acostumbra a indicar el paso por cero o paso por la posición de referencia.

Relativo: la carencia de una referencia absoluta en este tipo de sensor sólo permite obtener una medida de la variación de la posición, sin poder determinar la posición absoluta del rotor únicamente mediante este sensor.

El límite de operación acostumbra a situarse dentro del rango de velocidades del motor, esto significa que superado ese límite, la medida obtenida de este sensor deja de ser fiable.

La ventaja de este sensor respecto al sensor Hall es la elevada precisión que tiene.

La existencia de un límite de operación para cada sensor obliga a considerar distintos rangos de velocidades para la obtención de las variables, que posiblemente implique una

conmutación entre sensores en función del estado del sistema.

El hecho de que el *encoder* deje de ser útil a partir de una velocidad no es un factor especialmente relevante, pues a las velocidades en que esto ocurre (3600 RPM para el encoders usado en este proyecto) los sensores Hall proporcionan una cantidad de información más que suficiente.

Un último inciso en lo que refiere a ambos sensores, es que la naturaleza de estos sensores es nativamente discreta. La medida se obtiene de forma natural (debido a la arquitectura interna del sensor) en forma de señales eléctricas binarias a través de un bus de x canales. Este hecho permite considerar arquitecturas de control asíncronas prescindiendo del muestreador usado para sensores analógicos o de medida continua.

La ventaja de este método es la rapidez de actuación que de otra forma conlleva elevar la complejidad del muestreador. No obstante, se prescinde de estudiar este aspecto y las medidas se consideran a instante discretos síncronos al reloj de cada lazo de control.

2.3.2 Registros

En cuanto a lo que al controlador se refiere, los controladores digitales se gobiernan por medio de registros, siendo estos los responsables de almacenar toda la información relativa y necesaria para la operación del sistema de control.

Entre estos registros, interesan especialmente:

- Registro de demanda de voltaje por fase.
- Registro de demanda de voltaje por componentes directa/cuadratura.
- Medidas de corriente por fase.
- Medidas de corriente por componentes directa/cuadratura.
- Registros de valor de los sensores.
- Registros de objetivos o consignas de: par motor, velocidad y posición.

Según el caso, estos registros se usan como variable de entrada o de salida, se especifica debidamente en el capítulo 3 y 4.

3 Modelado del sistema

Para poder realizar la identificación del sistema y posterior sintonizado del control, es necesario tener un modelo matemático equivalente del sistema planta.

No es estrictamente necesario obtener un modelo físico del sistema para esto, pero es muy importante determinar el grado de complejidad del modelo (Anexo II).

Aún así, disponer de un modelo matemático a nivel físico del motor permite identificar los parámetros reales del sistema (como por ejemplo, resistencia, inductancia, inercias y coeficientes de pérdidas) especialmente útil para el mantenimiento predictivo o para la verificación mediante los datos ofrecidos por el fabricante del motor.

3.1 Modelo eléctrico

Al tratarse de un motor brushless DC, el modelo usado será el de una maquina síncrona de tres fases. Se aplica la simplificación de este modelo a una única fase [4], aunque, como se estudia al final del Anexo II, esto conlleva una serie de problemas pues, previamente a este modelo se aplican dos transformadas (Clarke y Parke) que se habrán de tener en cuenta a la hora de validar los datos obtenidos por la modelización.

Este punto es irrelevante en este estudio pues la identificación se realiza con las variables que se van a usar en el control y, al igual que ocurre con los sensores y actuadores, todos estos bloques adicionales quedan englobados en el bloque planta.

El modelo del cual se deducen las ecuaciones características del sistema es el de un motor DC de una única fase [8], [9]:

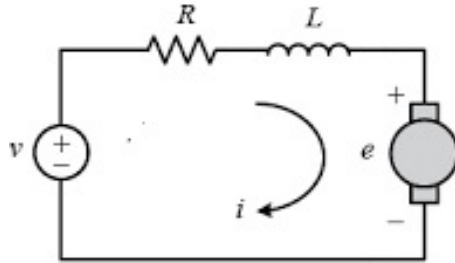


Fig. 3.8: Modelo eléctrico

donde:

- $v(t)$: fuente de voltaje del sistema, variable de entrada.
- $i(t)$: intensidad que circula por el circuito eléctrico, variable de salida.
- $Z = R + jL$: impedancia eléctrica del sistema.
Incluye la impedancia de los cables y conexiones que llegan al motor.

R : es la parte real de la impedancia.

Incluye la resistencia propia del devanado, así como la resistencia del cableado, las soldaduras y conexiones.

L : es la parte compleja de la impedancia.

Incluye la inductancia del devanado del motor, así como la inductancia propia del cableado.

- $e(t)$: fuente de voltaje dependiente.

Representa el voltaje inducido sobre el devanado del motor debido al giro del campo magnético originado por el imán del rotor (fuerza contraelectromotriz o *back ElectroMotive Force*). En el lazo de control se modela como una perturbación que afecta a la planta.

Escribiendo el voltaje de control $v(t)$ en función de estos parámetros:

$$v(t) = L \frac{di}{dt} + Ri + e(t) \quad (3.1.1)$$

La componente $e(t)$ se puede eliminar bloqueando el movimiento del rotor.

$$e(t) = K_E \omega(t) \xrightarrow[\forall t]{\omega(t)=0} e(t) = 0 \quad (3.1.2)$$

El modelo simplificado de la ecuación (3.1.1) mediante (3.1.2) (circuito RL):

$$G_e(s) = \frac{i}{v}(s) = \frac{1}{Ls + R} = \frac{K_{elect}}{\tau_e s + 1} \quad (3.1.3)$$

$$K_{elect} = 1/R \quad \tau_e = L/R$$

La deducción de estas ecuaciones, así como su extrapolación a varias fases se puede ver en el Anexo II.

3.2 Modelo mecánico

Para la parte mecánica del sistema, se usa el siguiente modelo, el cual acopla con la salida $i(t)$ y con la entrada $e(t)$ del modelo eléctrico [8], [1]

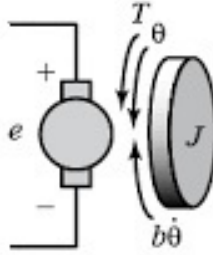


Fig. 3.9: Modelo mecánico

donde:

- $\omega(t) = \dot{\theta}$: es la velocidad angular del eje.
- $T(t)$ es el torque que está ejerciendo el motor.
Importante: no se trata del torque final disponible (torque útil), sino del torque resultante de la conversión eléctrica. Parte de este torque se "gasta" en pérdidas mecánicas.
- b es el coeficiente de fricción viscosa.
- J es el coeficiente de inercia del eje, o del eje más la carga (según proceda).

Escribiendo el par $\tau(t)$ en función de estos parámetros:

$$T(t) = J \frac{d\omega}{dt}(t) + b\omega(t) \quad (3.2.1)$$

donde la relación del par con la corriente:

$$T(t) = K_T i(t) \quad (3.2.2)$$

permite deducir:

$$G_m = \frac{\omega}{i}(s) = \frac{K_T}{Js + b} = \frac{K_m}{\tau_m s + 1} \quad (3.2.3)$$

$$K_m = K_T/b \quad \tau_m = J/b$$

Como es habitual no disponer más que de un sensor de posición, estimamos la velocidad angular de la siguiente forma:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow \theta = \int \omega * dt \quad (3.2.4)$$

que añade un integrador puro a la función de transferencia (3.2.3).

3.3 Modelo de identificación

Los modelos planteados están definidos en el dominio continuo (ecuaciones físicas definidas para cualquier instante de tiempo). La identificación se realiza a partir de medidas obtenidas en instantes de muestreo lo que conduce de forma natural a trabajar con modelos en tiempo discreto.

En el Anexo III se analiza la conversión entre ambos dominios teniendo en cuenta distintos factores que afectan esta conversión.

En el momento que se realiza el ciclo de identificación (capítulo 4), cualquier elemento dinámico que se sitúe fuera del dominio discreto en el que trabaja el algoritmo queda modelado de forma conjunta con la planta, incluyendo esta el conversor D/A, el motor o sistema, el sensor y el conversor D/A. A este bloque que engloba todo se le denomina, a partir de aquí **modelo**.

Para obtener el modelo de control se plantea la ecuación en diferencias del modelo ARX y se reordena hasta llegar a la forma canónica de un sistema discreto de primer orden.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\beta}{z - \alpha} = \frac{\beta/\alpha}{z/\alpha - 1} \equiv \frac{k_d}{\tau_d z - 1} \quad (3.3.1)$$

$$\tau_d = 1/\alpha \quad k_d = \beta/\alpha \quad (3.3.2)$$

A la hora de diseñar el control es importante verificar que las especificaciones se imponen únicamente sobre el sistema, y no sobre el modelo, pues las especificaciones del cliente están fijadas sobre el sistema.

Este desarrollo queda reflejado en los anexos por si resulta de utilidad en el desarrollo del control automático y mantenimiento predictivo de desarrollo futuro.

4 Identificación del modelo

Una vez se ha deducido el modelo de la planta, se define la estructura que se utilizará para la experimentación.

Esta estructura se presenta a continuación y se basa en cuatro módulos:

Generador de señal: se encarga de producir la señal de control basada en una serie de parámetros como: tipo de señal, rango y densidad de frecuencias, longitud máxima en muestras y método de compresión.

La salida se genera en frecuencia normalizada y valor máximo unitario, para obtener las unidades pertinentes a la consigna es necesario multiplicarlo por un factor de escalar.

Esta señal es un valor discreto de consigna que la electrónica después convertirá en una señal física.

Planta: en todo momento el núcleo central de estudio. Ya se ha definido.

Captador de señal: se encarga de registrar la variable de salida. En este caso está formado por el conversor A/D y los registros internos para el monitorización de las variables.

Algoritmo de identificación: usa los datos provenientes del generador de señal y del captador de señal para compararlos y ajustar los coeficientes de nuestro modelo.

4.1 Secuencia del algoritmo de identificación y sintonizado

El proceso de identificación presenta dos fases:

Modelo eléctrico

- Identificación del modelo eléctrico
- Sintonización del control de flujo/torque o control del modelo eléctrico
- Validación del modelo eléctrico + control

Mecánico

- Identificación del modelo mecánico

- Sintonización del control de posición y velocidad
- Validación del modelo de posición y velocidad + control

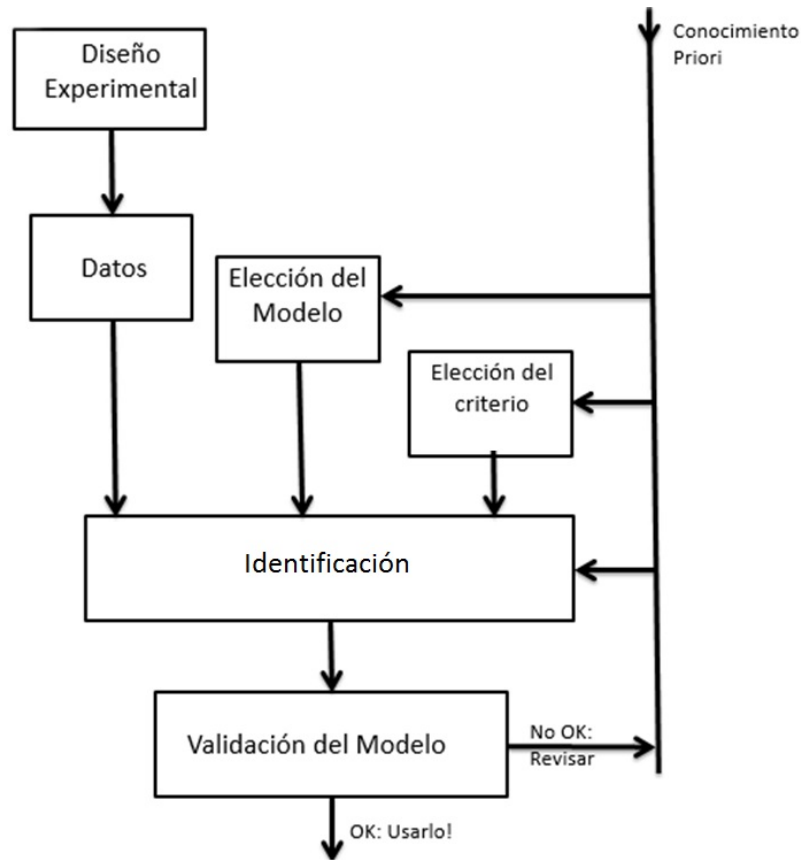


Fig. 4.10: Proceso de identificación

4.2 Señal de control

A partir de aquí, en todos los experimentos se usa una frecuencia de muestreo $T_s = 0.1ms [s]$ salvo que se especifique lo contrario.

Tal y como se analiza en el Anexo I, y como se puede ver en [3], [5], [6], [9], [1], la señal usada para excitar un sistema en las condiciones oportunas para que la observación de la variable de salida sea representativa acerca del comportamiento del sistema ha de tener unas características concretas.

En **Ingenia** usan una señal multisenso [3], [10], que tiene características frecuenciales muy interesantes para una identificación en el dominio espectral.

Tal y como se ha mencionado, el algoritmo actualmente usado por **Ingenia** se basa en un modelo ARX y ajuste por mínimos cuadrados, un método de ajuste temporal, lo que

refleja que la señal usada no es en absoluto óptima para identificación temporal.

Existen señales diseñadas para la identificación en el dominio temporal, una de ellas, muy usada por su simplicidad de implementación y calidad de la excitación temporal del sistema es la Secuencia Binaria Pseudo-Aleatoria o *PRBS* por sus siglas en inglés [11].

Se desarrolla una implementación que permite realizar la identificación tanto a nivel frecuencial como temporal, por lo que la señal multiseno se mantiene como la apropiada. La justificación de la elección se puede ver en el Anexo VI.

4.2.1 Comparación de métodos de optimización

Las múltiples senoides que componen un multiseno se calculan inicialmente con fase cero. Como se estudia en [3], el valor de cresta de la señal multiseno se desea que sea mínimo. Aquí entran en juego los algoritmos de optimización de fase: Saphiro-Rudin y Newman [3]. Para comparar los distintos métodos de optimización de fase se calcula el valor eficaz de la señal, el valor máximo y el factor de cresta de cada uno. Todas las señales tienen un valor máximo unitario, así que se estudia el valor RMS de cada una como equivalente al factor de cresta.

Teniendo en cuenta el criterio anterior, se realiza un análisis estadístico del valor RMS de cada señal:

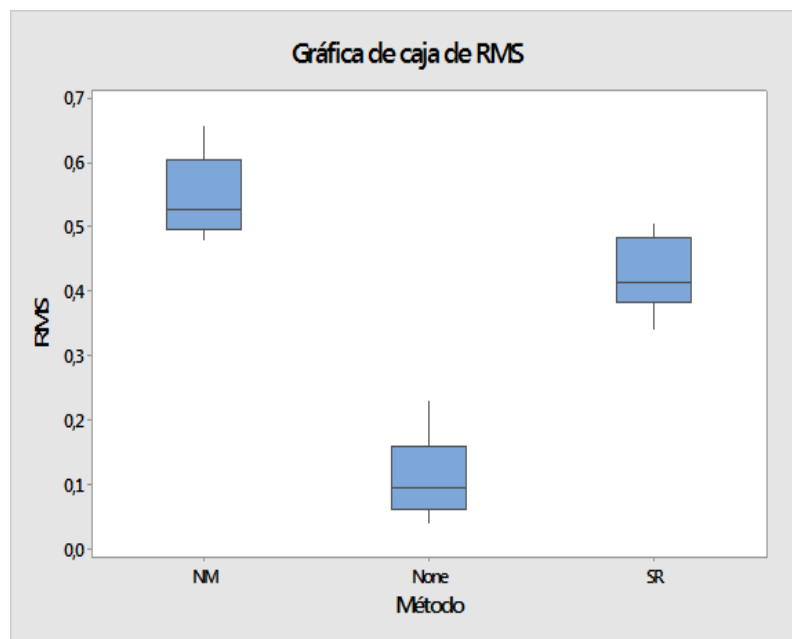


Fig. 4.11: Potencia RMS según el método de optimización

Se concluye que el método más apropiado es Newman. A partir de aquí se usan señales multisenos con algoritmo de optimización de fase Newman

aunque no se especifique.

Las muestras discretas de la señal se computan e inyectan en un registro del controlador para su inyección sobre la etapa de potencia.

El registro usado durante toda la experimentación es de 1000 muestras.

Se analizan criterios adicionales en el Anexo VI.

4.2.2 Optimización de fase Newman

El objetivo de la optimización de fase es reducir el factor de cresta (diferencia entre el valor de pico y el valor RMS) de la señal, con objeto de aumentar el factor señal-ruido y de hacer más equilibrado el espectro de potencia de la señal para poder ver las variaciones de potencia que introduce el sistema en el espectro.

Para generar el multiseno se fijan dos parámetros, la frecuencia máxima, que se fija en 2000 Hz para dejar un margen de ruido de referencia en la banda primaria, y una densidad de frecuencias o número de senoides que componen la señal.

Se ha concluido que el método es óptimo, pero exhibe el fenómeno se muestra en la Figura 4.12.

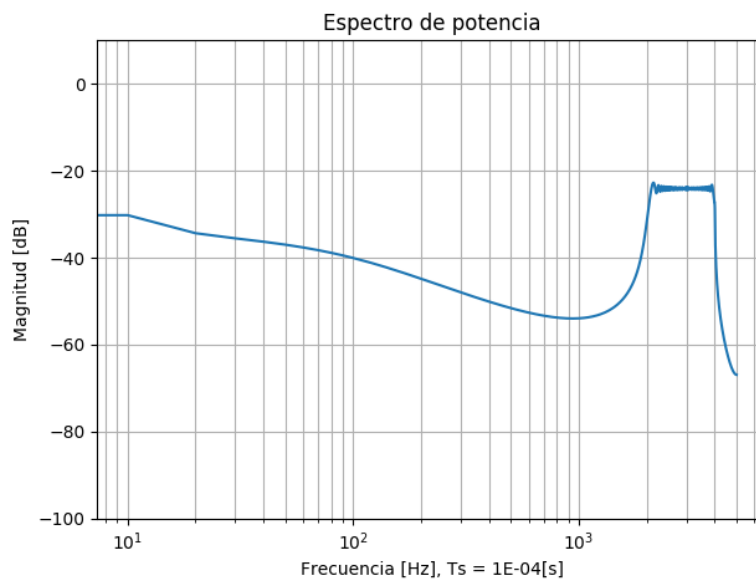


Fig. 4.12: Espectro de multiseno Newman, 4000 Hz, densidad 800

El ratio entre la frecuencia máxima y la densidad de frecuencias puede originar fenómenos extraños en el espectro, se analiza brevemente en el Anexo I. Este fenómeno está relacionado con el tamaño del registro.

El problema que representa la distorsión de esta señal sobre el algoritmo de identificación se puede ver al aplicar la señal sobre un sistema tal como se muestra en la Figura 4.13.

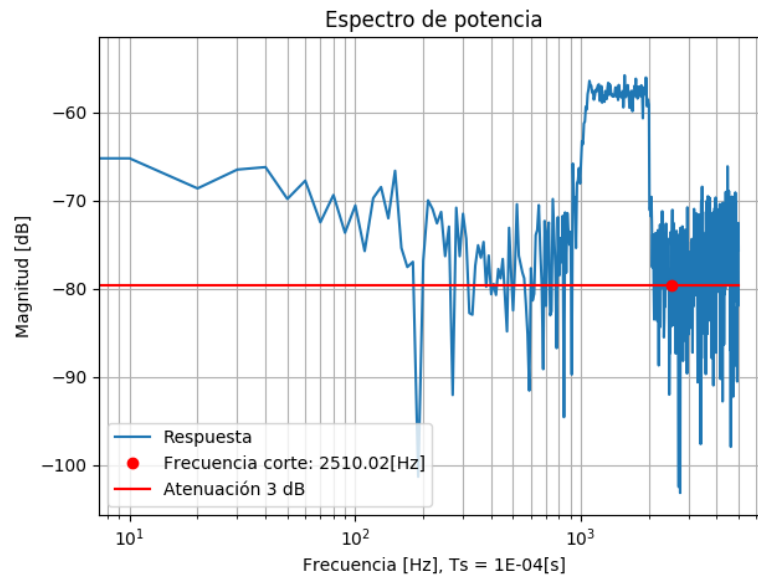


Fig. 4.13: Espectro de respuesta de una resistencia, frecuencia 2000 Hz, densidad 400

Se establece que la densidad de frecuencias ha de ser 10 para un registro de 1000 muestras. La justificación se puede ver en el Anexo VI.

4.2.3 Análisis de la relación señal ruido

Se realiza una experimento en el que se mide la relación señal-ruido para distintos elementos de referencia variando las amplitudes desde 1 hasta 50, para verificar la amplitud más apropiada para la identificación y como influye esta sobre los resultados.

La frecuencia máxima usada es de 2000 Hz en todos los casos.

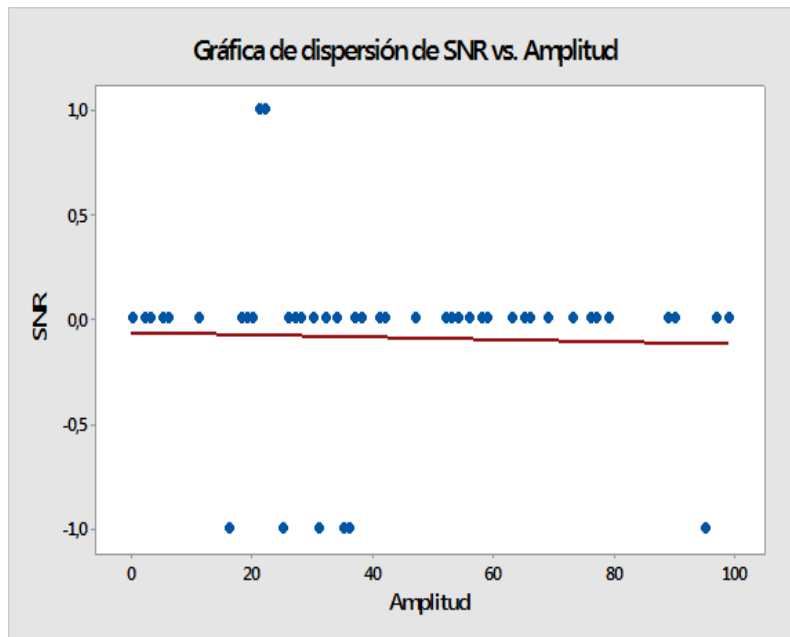


Fig. 4.14: SNR para una resistencia de 22 ohms

Se observa que el algoritmo de identificación con las condiciones de experimentación descritas (frecuencia máxima y voltaje) tiene precisión nula para resistencias puras de gran valor. No es un problema dado que los valores habituales de la resistencia en un motor son mucho más pequeños.

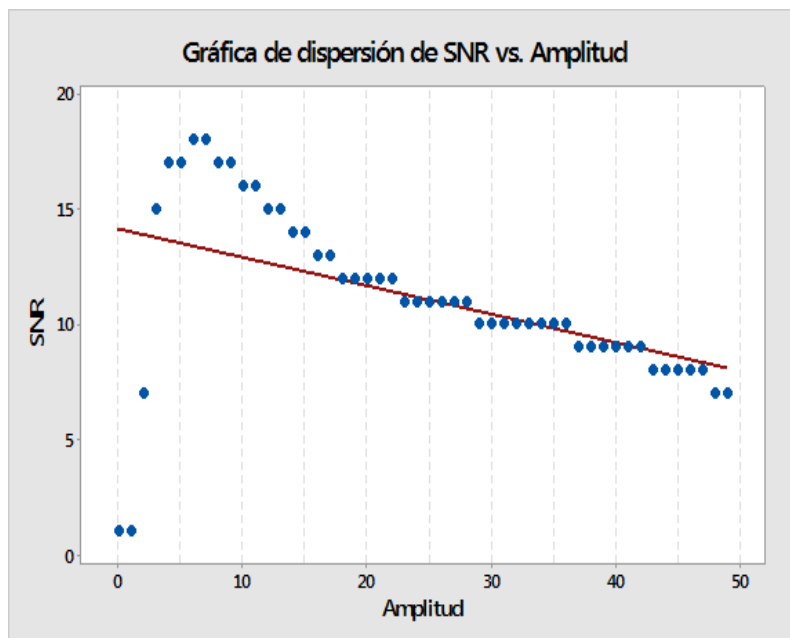


Fig. 4.15: SNR para una resistencia pequeña de valor desconocido

Pero para resistencias de valores habituales en motores la relación señal-ruido.

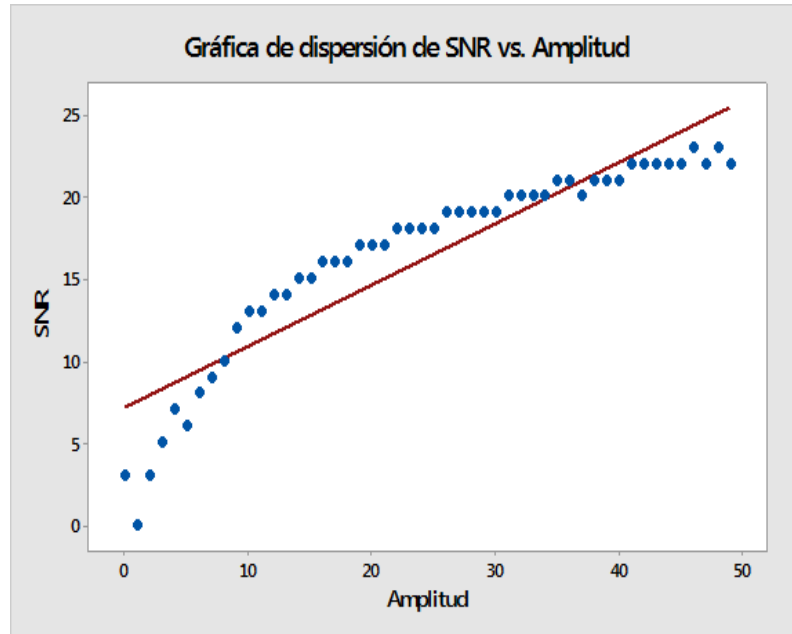


Fig. 4.16: SNR para una inductancia de 331 mH

Se realizan pruebas para distintos valores de inductancia (por ser el circuito característico que se encuentra en la parte eléctrica de un motor) y se verifica que todas siguen la misma tendencia.

En vista de estos resultados, y teniendo en cuenta que la resistencia presenta un pico de menor ruido, al tiempo que la inductancia presenta una tendencia lineal creciente, se concluye que el valor óptimo para realizar la identificación eléctrica es de un 10% del voltaje total por fase.

Se cumple así mismo el criterio de $SNR \geq 6dB$ anteriormente descrito.

4.2.4 Análisis de la respuesta temporal de un sistema ante un multisenso

A continuación se muestra la respuesta temporal del motor síncrono usado para la experimentación ante un multisenso.

La amplitud de la señal de entrada ha de ser mucho mayor para tener datos representativos en la identificación temporal (Figura 4.17).

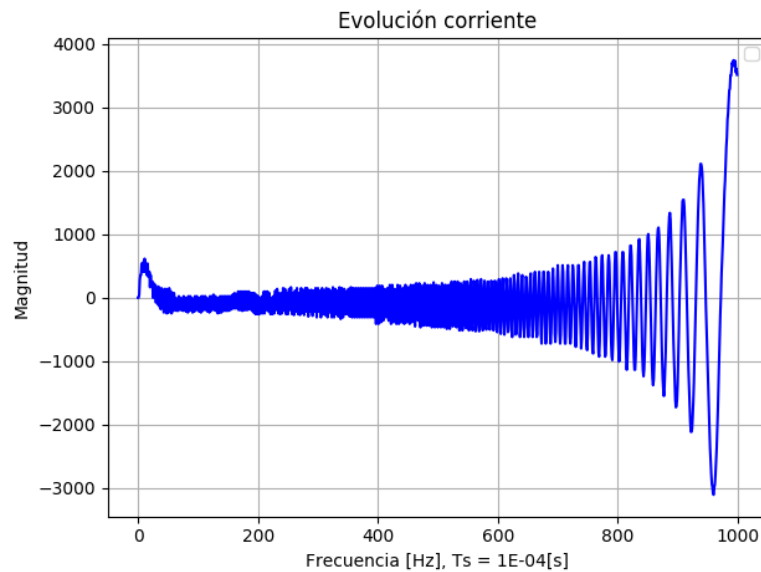


Fig. 4.17: Respuesta temporal de un motor ante un multisenso

Se incluye esta imagen con propósitos meramente ilustrativos, pues es bastante ilustrativa en el dominio temporal del contenido en frecuencia, adicionalmente se usa para la verificación visual.

Se concluye que la señal óptima para realizar la identificación es un multisenso de Newman, con una frecuencia máxima de 2000 Hz , un espaciado entre frecuencias de 10 Hz y una amplitud de entre 10 y 50%, cuyo valor se analiza en el Anexo VI.

4.3 Consideraciones del dominio temporal y frecuencial

Se han expuesto conceptos de análisis en el dominio temporal y frecuencial, en los Anexos I, II y III se puede profundizar en las implicaciones que tiene cada uno. A continuación se exponen la más importante:

- En el dominio temporal, se puede realizar una identificación a un paso, usada principalmente en la identificación y control adaptativo o a tiempo real, esto significa que el algoritmo usa la muestra anterior y la presente para predecir la siguiente muestra [3].

A pesar de ello habitualmente cuenta con información de más muestras (ventana más grande) pasadas para predecir la siguiente muestra.

La información pasada se utiliza en el algoritmo de minimización del error de predicción, garantizando que la operación del sistema durante una ventana de tiempo es óptima y despreciando las variaciones puntuales e imprevistas que afecten de forma poco significativa al sistema.

- En el dominio frecuencial esta interpretación es más directa, la ventana de observación condiciona directamente la frecuencia máxima que se puede observar. Esto significa que ventanas de tiempo pequeñas solo permiten detectar frecuencias cuya variación respecto del tiempo es muy rápida, o en otras palabras aquellas cuyo período es menor que el tamaño de ventana usado.

Esto pone de manifiesto que el período de observación del sistema queda muy condicionado por la cantidad de muestras (que en un sistema discreto de frecuencia de muestreo fija equivale al tiempo de medida) que se registran.

Cuanto mayor es la ventana de observación, mayor información se obtiene en las frecuencias de mayor período, esto tiene como consecuencias directas:

- Mayor exactitud en la determinación de la ganancia estática del sistema.
- Mayor exactitud en la determinación del ancho de banda.
- Mayor rango de filtrado para las frecuencias elevadas, lo que condiciona el grado de post-procesamiento realizable.

Poniendo énfasis en que el plano de la frecuencia tiene un carácter puramente estadístico, y considerando los factores expuestos, todos los conceptos analizados en este proyecto se validan e interpretan mediante análisis espectral.

4.4 Consideraciones de precisión y exactitud

A lo largo de toda la experimentación se aplica un criterio recurrente que es necesario explicitar:

Se prima en todo momento la precisión frente a la exactitud. Este criterio se verifica mediante datos estadísticos que garanticen la estabilidad e invariabilidad de las medidas ante distintas condiciones de experimentación.

La justificación de este criterio es la simplicidad que supone calibrar un sistema en cuanto a exactitud, cuando la precisión alcanzada es buena.

Además, a calibración del algoritmo es particular para cada controlador, y según las tolerancias de fabricación del sistema de medida, puede serlo para cada ejemplar concreto. No se realiza un estudio de la calibración del sistema de medida en cuanto a exactitud.

Este criterio se profundiza en el Anexo VI.

4.5 Identificación del modelo eléctrico

4.5.1 Bloqueo del rotor, eliminación de la fuerza contraelectromotriz

Como se menciona en la Sección 3.1, la corriente autoinducida se modela como una perturbación que afecta a la planta (3.1.2). Para eliminar este factor, se puede bloquear el giro del rotor, aunque es habitual (y uno de los objetivos detrás del proyecto plantear una solución) que no sea posible bloquear el giro.

Para ello se plantean tres opciones:

- Bloqueo físico del rotor (no siempre posible).
- Señal de entrada de muy baja amplitud (apenas se mueve), presenta el problema de la elección de la amplitud de la señal de entrada si se quiere tener un buen margen señal-ruido [3], donde es posible que la amplitud realizable no sea tan pequeña como sería necesario para que el rotor no se mueva.
- Bloqueo por corriente directa: como se ve al final del Anexo II, permite bloquear el motor por medio del campo magnético, la única desventaja que presenta este método es que solo es aplicable para máquinas síncronas de varias fases controladas mediante algoritmo FOC.

Es preciso, además, realizar un alineado de la conmutación de las fases previo al bloqueo, de lo contrario el rotor se moverá.

Para el resto de topologías de máquinas eléctricas es necesario recurrir a una de las dos opciones anteriores.

La última opción es la más elegante y además soluciona de forma directa el punto 5 de los objetivos del proyecto, desde *Ingenia* ya habían propuesto esta solución, pero no estaba implementada.

En Pluto no está disponible esta opción, aunque si lo está en la serie Summit.

4.5.2 Método de análisis

Se realizan dos forma de análisis:

1. Estimar los parámetros equivalente que usa el algoritmo de control de orientación de campo (directa-cuadratura) que son las variables que usa el controlador cuando se trabaja con máquinas síncronas de varias fases.
2. Correlacionar las variables voltaje e intensidad por fase.

Para un motor DC monofase es la única opción y es equivalente a la anterior, para un motor sin escobillas es una opción que permite refinar la transformada FOC (Anexo II, [2]) teniendo en cuenta que los parámetros de cada fase pueden ser distintos y además es necesario en la identificación de parámetros individuales de cara al control predictivo y a la validación de resultados.

Se configura el controlador de forma que todos los lazos están abiertos, los controles puenteados y el punto de inyección se sitúa justo antes del ondulator, de forma que se inyecta la consigna de voltaje justo antes del sistema, sin que haya algún elemento previo que modifique esta consigna.

Esto es, realmente, poco relevante como se verá posteriormente, pues acabamos trabajando midiendo la consigna última del controlador (donde no tenemos acceso para inyectar ninguna consigna).

4.5.3 Verificación del modelo eléctrico

Para verificar el modelo eléctrico se identifica el modelo y mediante un predictor se simula la respuesta del sistema.

Si la predicción se ajusta en alto grado a la salida medida, se concluye que el modelo hallado modela con suficiente precisión el sistema real.

La verificación se realiza de dos formas:

Estimador de calidad:

$$Q = 100 * \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2}{N}}}{|max(y, \hat{y}) - min(y, \hat{y})|} \right) \quad (4.5.1)$$

Que realiza un promedio ponderado de la diferencia entre la predicción y la medida, y la compara con la excursión máxima de la salida o la predicción.

Se observa durante los análisis que puede dar lugar a resultados no concluyentes:

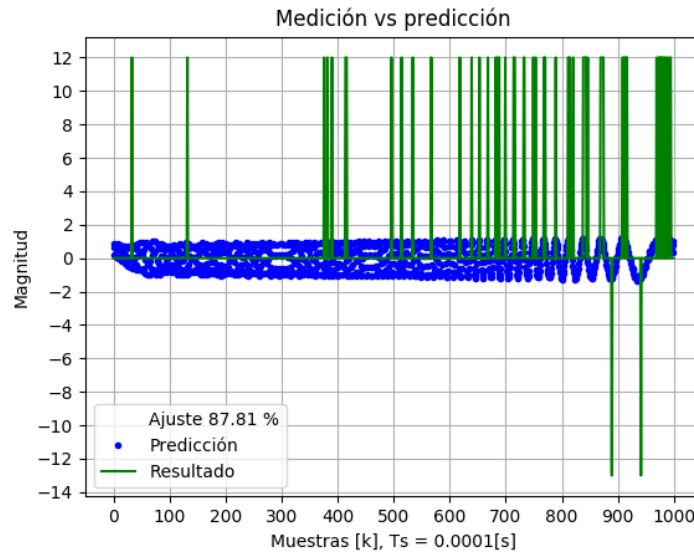


Fig. 4.18: Identificación del motor DB43M03 y ventana de 40 muestras

Que a pesar de la apariencia, se comprueba que realmente es un modelo válido, pues el algoritmo es capaz de determinar con una precisión elevada las ocurrencias de los picos de señal. La detección de frecuencias bajas es muy precisa, fenómeno habitual dado que la baja tasa de cambio o velocidad de las frecuencias graves las hace fáciles de observar. Además, estas frecuencias reciben casi toda la energía inyectada en el sistema, con lo que sus características señal-ruido también son mejores que en la región alta del espectro.

Visualmente: La validación visual es la forma más inmediata de detectar errores significativos en el modelado.

A continuación se listan una serie de figuras representativas del proceso de identificación:

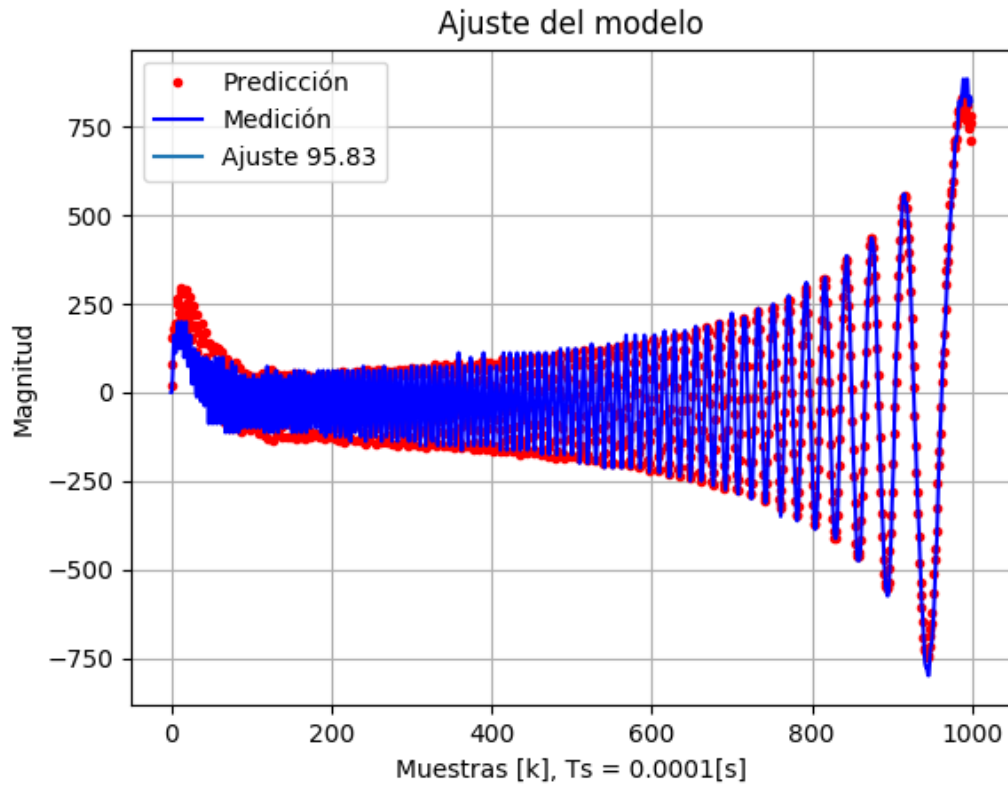


Fig. 4.19: Verificación de la identificación, predictor y estimador de calidad

Volviendo a dar importancia al factor comentado anteriormente, la predicción de las frecuencias lentas es muy precisa. Observables al final de la respuesta del sistema, respuesta de los polos dominantes, que son justo los que se han modelado.

En el transitorio se observa una diferencia relativamente significativa, esto se debe al amortiguamiento que presenta el sistema para frecuencias altas.

Se observa el retardo entre el modelo y la medida:

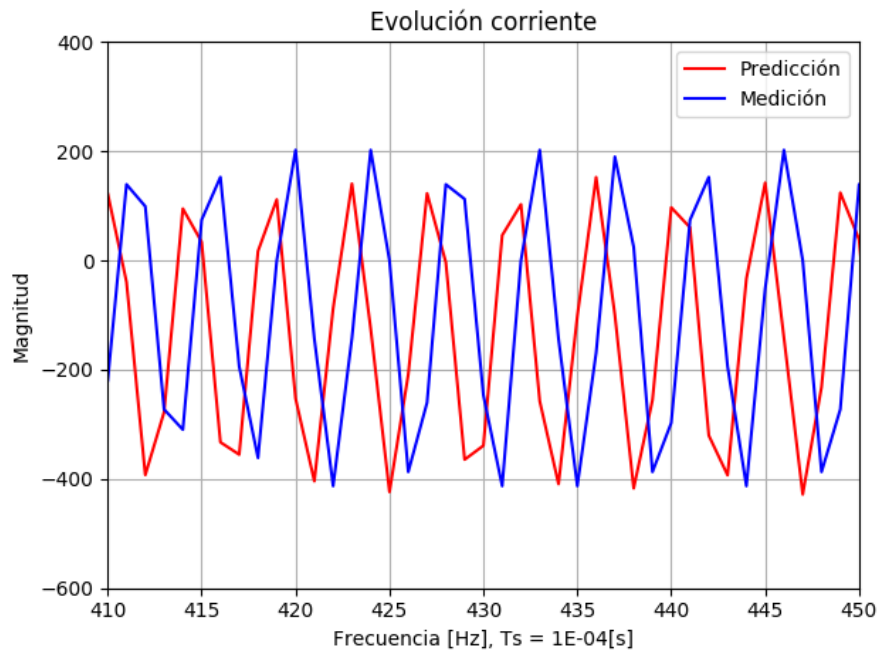


Fig. 4.20: Comparación del modelo y la medida

Aplicando la corrección de una muestra:

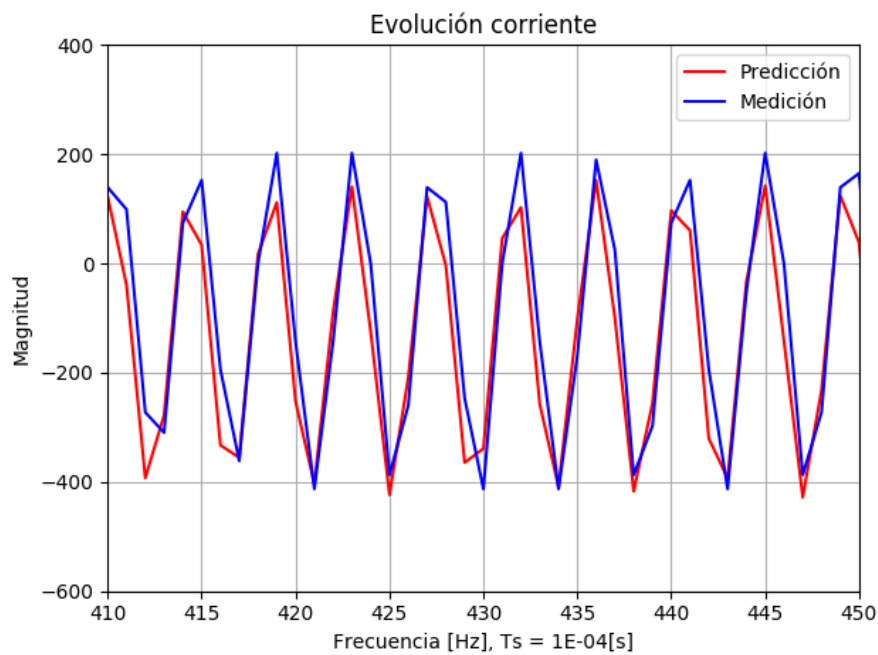


Fig. 4.21: Comparación del modelo y la medida, retardo corregido

Este retardo solo afecta a las frecuencias situadas, o bien cerca de la frecuencia de corte de la señal de inyección multiseno, o bien cerca de la frecuencia de corte del sistema. La frecuencia de corte de una señal o sistema va asociada siempre a un desfase (es de hecho la causa de esta reducción de ganancia), de aquí que en las frecuencias más estables (bajas) este fenómeno no sea significativo ni, de hecho, apreciable en el gráfico.

Por último, se comparan los espectros de la medida real y la predicción:

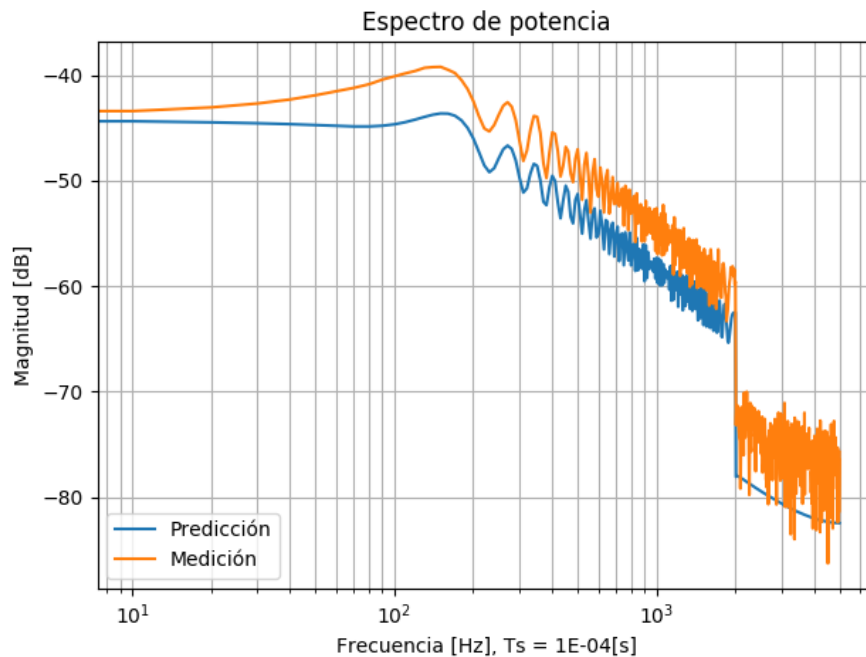


Fig. 4.22: Análisis frecuencial de la respuesta predicha y simulada

Se puede observar que las respuestas medida y simulada son coherentes a pesar de una resonancia existente sobre los 100 Hz que el modelo lineal de primer orden no contempla.

El error de modelado no es aleatorio, se podrían analizar y enunciar las múltiples procedencias de la causalidad del error, pero debido a que su magnitud es muy pequeña comparada con la magnitud de la señal medida, no es necesario considerarlo como un factor especialmente importante para la identificación. Se puede ver su análisis en el Anexo VI.

4.6 Condiciones destructivas del algoritmo

El punto 6 de los objetivos hacía mención a que ciertas condiciones de funcionamiento del algoritmo son potencialmente destructivas para el motor, el controlador, o ambos.

Durante la experimentación se puede verificar este hecho, destruyendo de forma permanente la etapa de potencia (ondulador o modulador) del controlador.

Tras analizar las condiciones de la experimentación y mediante el análisis del filtrado R-L del motor (se puede ver en la sección 4.3 del Anexo I), se concluye que el problema deriva de la inyección de cantidades ingentes de potencia en frecuencias elevadas, las cuales la inductancia (debido a sus propiedades de relación voltaje-intensidad) amplifica notablemente estas frecuencias así como las de todos los armónicos presentes debido al cambio de dominio. La disipación de energía térmica en estas frecuencias puede significar la destrucción del motor y/o de la etapa de transistores y diodos del ondulator.

Debido al carácter destructivo de estas condiciones, las pruebas no pueden realizarse sin asegurar que se miden las condiciones cercanas a este punto sin llegar al punto de destrucción, por lo que las pruebas aún están en curso dentro de la empresa **Ingenia**.

5 Diseño del control

5.1 Fijación de especificaciones

Desde **Ingenia** acostumbran a fijar los requerimientos del cliente mediante el ancho de banda deseado y el sobrepico permisible (ver Anexo IV).

El ancho de banda se determina mediante la frecuencia en la que la ganancia estática del sistema se reduce en 3 dB (Anexo I).

El sobrepico se determina mediante el factor de amortiguamiento ξ de un sistema equivalente de segundo orden (Anexo VI).

Es necesario realizar las siguientes consideraciones:

- Las especificaciones se solicitan sobre el sistema motor. Se ha comentado repetidas veces que el modelo obtenido contiene tanto el reconstructor como los sensores. Es frecuente no disponer del modelo de los sensores por separado, el modelo del reconstructor sin embargo es bastante estandar y si que se conoce la función de transferencia. Será necesario fijar las especificaciones sobre el sistema motor y no sobre el sistema modelo, lo que significa que la dinámica del reconstructor se ha de separar debidamente (Anexo III).
- Para fijar la especificación de sobrepico y el ancho de banda se recurren a modelos en el dominio continuo, o en su defecto aproximaciones continuas de un modelo discreto. Es necesario tener en cuenta una serie de consideraciones al realizar esta equivalencia (Anexo I, Anexo III).

Por simplicidad, se fija un único polo real múltiple que fije el ancho de banda y no presente sobrepico.

Se analiza el proceso de fijación de un polo doble complejo donde se pueda fijar el factor de amortiguamiento.

5.2 Sintonizado del control de flujo y torque

El control de flujo y torque se separa en dos bloques: Si se trata de un motor monofase, únicamente se sintoniza el control de torque.

Si se trata de un motor sin escobillas controlado por FOC, se sintonizan el control de torque, que actúa sobre el voltaje cuadratura, y el control de flujo, que actúa sobre un lazo cerrado de realimentación y consigna nula para el voltaje directo.

Se propone (para futuros estudios) ver si la consigna de voltaje directo puede ser útil para considerarla cuando, por ejemplo, se busca frenar el rotor independientemente del par aplicado.

Ambos controles tienen una estructura PI, y se sintonizan conjuntamente dado que los parámetros del modelo eléctrico son los mismos para ambos.

La serie **Summit** tiene una variante de esto que es un control PI con feedforward.

El problema detectado en los trabajos anteriores ([1], [9]) a la hora de diseñar el sistema de control es la forma de asignar las especificaciones.

La función de transferencia lazo cerrado para un sistema de primer orden y control PI:

$$\begin{aligned}
 W_1(s) &= \frac{k_m(K_p s + K_i)}{\tau_m s^2 + s + k_m(K_p s + K_i)} \\
 &= \frac{k_m/\tau_m(K_p s + K_i)}{s^2 + \frac{k_m K_p + 1}{\tau_m} s + \frac{k_m K_i}{\tau_m}}
 \end{aligned} \tag{5.2.1}$$

La función de transferencia lazo cerrado para un sistema de primer orden y control PID:

$$\begin{aligned}
 W_1(s) &= \frac{k_m(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{\tau_m s^2 + s + k_m(K_d s^2 + K_p s + K_i)} \\
 &= \frac{\frac{k_m}{\tau_m + k_m K_d}(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{s^2 + \frac{1 + k_m K_d}{\tau_m + k_m K_d} s + \frac{k_m K_i}{\tau_m + k_m K_d}}
 \end{aligned} \tag{5.2.2}$$

Se puede ver en las ecuaciones que la función de transferencia en lazo cerrado presenta uno o más ceros (raíces del numerador).

Cuando se fijan las especificaciones, se acostumbra a comparar esta función de transferencia con la de un sistema genérico, en el que se fijan las especificaciones (Anexo 4), proceso conocido como asignación de polos.

Cuando aparecen grados de libertad en el numerador (o mayor número de grados de libertad en el denominador) es necesario asegurar la dominancia de los grados de libertad

fijados sobre el resto.

En el caso del numerador en este caso, al fijar los polos del denominador, el numerador queda fijado invariablemente. El problema de este numerador es que la aparición de un cero adicional invalida las especificaciones fijadas, pues modifica tanto el ancho de banda como el factor de amortiguamiento, imposibilitando tanto cumplir los requisitos de diseño del cliente como la validación del sistema de control.

5.3 Soluciones previas

El trabajo previo realizado por Pau Segovia Castillo [1] plantea como solución la estructura I-PD y/o la estructura RST (que en el fondo son equivalentes).

En estas estructuras se consigue evitar la aparición del cero en el numerador mediante un sencillo cambio de estructura.

Esta nueva estructura no es especialmente compleja de implementar en el *firmware*, pero debido a la complejidad del sistema de control actual de los controladores de **Ingenia** en los que se incluyen diversas prealimentaciones o *feedforward*, con lo que cambiar la estructura conlleva un trabajo considerable.

Se consideran en vista de esto, nuevos métodos de asignación de especificaciones compatibles con el diseño vigente.

5.4 Nuevo planteamiento de sintonizado del control

El planteamiento de esta nueva forma de determinar el control es habitual en el campo del sonido profesional (ingeniería de sistemas de audio y señal), donde los controles son conocidos como ecualizadores o filtros, y se fijan de modo manual (mediante técnicas de análisis espectral) en las zonas de interés.

El punto de partida es la interpretación frecuencial que tienen los controles:

Proporcional: elemento neutro, solo modifica la ganancia.

Integral: se comporta como un filtro paso-bajo de primer orden, amplificando las frecuencias lentas y atenuando las agudas.

Derivador: se comporta como un filtro pasa-altos de primer orden, atenuando frecuencias lentas y amplificando las agudas.

Es bastante peligroso debido a que al amplificar las frecuencias elevadas también se amplifica de forma potencial el ruido del sistema y frecuencias indeseadas. Especialmente preocupante en el dominio discreto.

Refiriéndose a la sección 5.2, el denominador se comporta como un control integral y el numerador como un derivador. El comportamiento proporcional no es especialmente

relevante en este planteamiento.

Se considera cada sistema de referencia mencionado en Anexo IV como un filtro, por las implicaciones que supone esto a la hora de diseñar el control.

Como solución se plantean dos métodos de asignación de especificaciones.

- Añadir un grado de libertad al sistema de referencia en el que fijamos las especificaciones, en este planteamiento se ha decidido fijar el grado de libertad k sobre la ganancia cada filtro en la frecuencia de corte fijada. Esto significa que la frecuencia de corte del filtro será aquella que garantice la reducción de ganancia deseada en la frecuencia de corte fijada.

La concatenación de varios filtros permite deducir una ecuación adicional que relaciona este grado de libertad adicional, estableciendo que la ganancia de todos los filtros en la frecuencia de corte fijada por el usuario sea -3 dB .

- Fijar el cero en una región muy alejada de la banda activa o lejos de la frecuencia de corte impuesta, para ello se aplica el criterio de dominancia de un polo o cero, o su equivalente que es fijar la frecuencia del numerador (calculada en el Anexo IV).

En este caso, aún sin fijar el parámetro k , se pueden fijar todas las especificaciones.

Ambos planteamientos conllevan desarrollos matemáticos largos y complejos, se han desarrollado en la medida de lo posible en el anexo, pero no se ha llegado a concluir las equivalencias.

Se deja reflejado aún así para posible continuación de su estudio en desarrollos futuros.

5.5 Notas sobre el control

Se han expuesto criterios de diseño que, sin embargo, no han sido verificados y por lo tanto no deberán aplicarse sin previamente haber sido revisados.

El motivo de, aún así, reflejar este desarrollo inconcluso, es dejar constancia de una base que permite el diseño del sistema de control de los controladores de **ingenia** sin necesidad de variar la estructura de control.

La justificación de no profundizar en este aspecto es el carácter matemático del proceso de sintonizado del control. Si se dispone de un buen modelo de la planta, la sintonización de la estructura de control es inmediata si se dispone de las equivalencias algebraicas que relacionan las constantes del control con los parámetros modelados de la planta.

6 Herramientas *software*

Durante todo el proyecto se desarrollan mediante *python* las herramientas que se usan para la identificación y validación de todos los experimentos. Esto conlleva un trabajo añadido de gran magnitud que por otro lado, permite entender en profundidad el funcionamiento del algoritmo, las señales usadas y todo el sistema.

Se dispone de la librería **IngeniaWizard**, librería desarrollada en *C#* y actualmente en proceso de traducción a *python*. Esta librería permite incorporar los controladores en cualquier entorno de una forma simple y efectiva, lo que abre las puertas al diseño de sistemas completamente integrados haciendo uso de las funciones más avanzadas de los controladores.

MotionLab hace uso de estas librerías para funcionar, de hecho **MotionLab** es, a grandes rasgos, la interfaz gráfica de las librerías (debido a que hacer uso de las librerías requiere de unos conocimientos base de programación y uso del terminal).

6.1 Análisis del algoritmo de identificación previo

Al iniciar el proyecto, **Ingenia** disponía de una versión preliminar del algoritmo de identificación ya integrada en *python*, a pesar de ello el algoritmo no era plenamente funcional y no estaba validado. Tampoco estaban documentados los criterios usados para el desarrollo e integración del algoritmo, y en vista de que las primeras pruebas realizadas no resultan concluyentes al respecto del funcionamiento, se decide revisar el algoritmo desde los cimientos más básicos, asegurando cada punto del mismo.

Objetivos adicionales del proyecto implicaban el diseño de señales de control de otra índole para permitir más tipos de validación, motivo por el cual era necesario retocar el código para implementar ciertas funciones.

El mayor cuello de botella que se observa en la cronología del proyecto se debe a que las herramientas existentes están muy integradas en el algoritmo de identificación y solo permiten la realización de pruebas muy concretas.



6.2 Estructura de las herramientas desarrolladas

En virtud de lo anterior, se rediseña desde cero el módulo de identificación, separando de forma modular cada función implementada para que pueda ser usada de forma autónoma con otros fines, criterio que además flexibiliza la creación de nuevas estructuras de identificación, control y validación sin apenas modificaciones, tratando en todo momento de crear una caja de herramientas la suficientemente abierta a la experimentación sin requerir modificaciones del código desarrollado.

Este criterio sigue la línea de diseño aplicada en el resto de departamentos de **Ingenia** en el que se diseñan y verifican todos los módulos de *hardware* y *firmware* de forma separada para facilitar el diseño de soluciones a medida de forma fácil, rápida y funcional.

Cada módulo está constituido por una clase (ver *python*), que recibe una serie de argumentos o parámetros de configuración cuando esta clase es creada, y contiene una serie de propiedades de solo lectura donde se reflejan todas las variables de estado internas de esa clase.

El acceso a estas clases se realiza por medio de la consola o terminal y su diseño está orientado a la futura integración en los algoritmos finales de identificación y autosintonizado así como al desarrollo de la interfaz gráfica en **MotionLab**.

Código 6.1: Creación de la clase generador de señal

```
sg = SignalGenerator(cycle_number=1, max_amplitude=100,
                    signal_type='multisinus', phase_method='none',
                    registry_length=1000, sampling_freq=10000,
                    freq_density=1000, freq_max=2000)
```

Se puede ver en el ejemplo el modo de creación de una de las clases desarrolladas. Otro de los criterios usados para definir la clase de esta forma es la posibilidad de usar ficheros de texto con los parámetros de la configuración deseada, de forma que cada prueba pueda ser configurada mediante ficheros de texto previamente configurados.

Este enfoque ha sido ampliamente usado a lo largo del proyecto para generar conjuntos de datos experimentales de forma sistemática, lo que permite realizar análisis estadísticos de experimentos en distintas condiciones.

NOTA: este principio es ampliamente aplicado en programas de diseño y análisis paramétrico como el *Parameter Set* disponible en **Ansys Workbench**.

NOTA: la herramienta está pensada para funcionar de fondo; no se adjuntan capturas significativas de la mayoría de módulos dado que no tienen interfaz gráfica, sin embargo toda la programación (a nivel matemático) está debidamente documentada en los anexos.

Algunos módulos no están terminados, a pesar de ello las funciones se han implementado y verificado, quedando pendiente el diseño de la clase que englobe y permita acceder

a todas estas funciones de forma sencilla.

Para la representación de datos se usa la librería *Matplotlib*.

Para ciertas operaciones matemáticas se usa la librería *numpy*.

Los módulos ya se han introducido en el capítulo 4, y son:

6.3 Signal Generator

Este módulo integra las ecuaciones definidas en el Anexo I para la generación de señales en el dominio discreto.

Las señales que es capaz de generar:

- Senoide: la señal más básica, sin tener en cuenta la continua, de cualquier sistema que evolucione en el tiempo.

Como particularidad de esta función, se integra una versión de la senoide con corrección de la longitud del registro usado para evitar el manchado espectral. El manchado espectral es especialmente indeseado cuando la senoide se usa como consigna de posición o velocidad y presenta una discontinuidad. Esto ocasiona aceleraciones elevadas y corrientes de gran magnitud que en ciertas condiciones de experimentación pueden ser peligrosas o destructivas.

- Multisinus: la señal recurrente a lo largo de todo el proyecto, que no es más que un sumatorio de senoides.

Dentro de esta señal se puede elegir el método de optimización a usar: ninguno, Saphiro-Rudin o Newman.

- Escalón: señal básica en la caja de herramientas de cualquier ingeniero de sistemas, permite medir la ganancia estática o realizar diagnosis rápida del funcionamiento del equipo.

Además es válida para la identificación temporal.

El retardo ajustable posibilita incluso composición de señales y filtrado por retardo de fase.

- Cuadrada: debido a la facilidad de implementación se ha introducido esta señal.

Los parámetros ajustables para el generador son:

- Signal type: selecciona la señal a generar entre multisinus, sinus, square o step.
- Registry length: número máximo de muestras permisible. Si es posible se llenan, si no (caso *corrected leakage* o corrección del manchado espectral) se llena el máximo posible.
- Sampling freq: frecuencia de muestreo usada, permite trabajar internamente con frecuencia normalizada.

- Freq density: permite definir la cantidad de frecuencias que se generan. Solo se usa para señales con más de una frecuencia (pej: multiseno, barrido o *chirp*).
- Max amplitude: porcentaje del valor máximo de la señal. Todas las señales se generan con un valor de pico absoluto unitario, esto hace necesario escalar posteriormente el valor generado mediante una constante, pero permite mayor control sobre la señal y evita consecuencias destructivas para valores muy elevados de la señal (se detalla MÁS adelante).
- Phase method: determina el algoritmo de compresión del multiseno. Se mantienen los métodos implementados de Saphiro-Rudin y Newman.
- Cycle number: si se quieren generar varios ciclos de una misma señal, especialmente interesante para conseguir formas de onda compleja. Se advierte que usar este factor puede sobreponer la respuesta del sistema para ciertas señales de control, efecto probablemente no deseado para ciertas señales de control diseñadas con una forma concreta a un único ciclo.
- Freq max: define la frecuencia en *Hz* máxima a generar. En caso de señales con un único parámetro de frecuencia se toma como la frecuencia deseada.

Se cuenta con un factor adicional implementado a nivel de *firmware* que permite reproducir las muestras mediante un divisor de reloj, lo que permite obtener frecuencias mucho más bajas que el límite impuesto por la longitud del registro y la frecuencia de muestreo (Anexo I).

Este módulo es usado durante toda la experimentación y validación de resultados.

6.4 Signal Capture

Como esta función es específica de cada controlador no se profundiza en el funcionamiento de este módulo.

Su función principal es lidiar con la estructura del controlador para configurar todos los registros, puntos de inyección (mencionados en la sección 2.3) así como la longitud de muestras capturada.

6.5 Análisis temporal

Este módulo no está terminado.

Se compone de:

- Representación de la respuesta temporal: crea una representación gráfica de los datos de una secuencia de entrada.



- Identificación temporal: basado en el algoritmo de ajuste ARX por el método de mínimos cuadrados (pseudo inversa de Moore-Penrose) previamente implementado. Calcula una matriz con los parámetros identificados del modelo.
- Predictor: mediante una secuencia de entrada y el modelo obtenido de la identificación temporal calcula las muestras de salida (simulación de la respuesta del sistema).
 - * Predictor a un paso: requiere de la secuencia de respuesta del sistema, pues únicamente predice el valor de una muestra por delante de la actual.
 - * Predictor infinito: partiendo de un valor nulo de la salida calcula el valor de la respuesta para todos los valores de la secuencia de entrada. Es equivalente a simulación pura.
- Estimador de calidad del ajuste: establece un criterio cualitativo que permite comparar la respuesta ante el predictor infinito (simulación pura) y la respuesta real. Se observa que el estimador actualmente usado tiene una gran debilidad para señales muy ruidosas y es necesario revisarlo o sustituirlo.
- Determinación del retardo: calcula el número de muestras de retardo que presenta la señal de respuesta.

6.6 Análisis frecuencial

Este módulo no está terminado, se han verificado cada una de las funciones implementadas pero no existe una clase con parámetros tan definida como signal generator.

Todas las funciones se basan en la función *fft* de la librería *numpy*, que realiza la transformada rápida de Fourier de forma eficiente.

Se implementan dentro de este módulo:

- Diagrama frecuencial: calcula la magnitud de la transformada de Fourier y la representa en un gráfico amplitud frecuencia.
Se implementa el análisis de fase (argumento de la transformada de Fourier) aunque no se llega a usar en el proyecto.
- Potencia RMS: se calcula el valor de la potencia de la señal mediante el criterio RMS.
- Determinación de la ganancia estática: mediante un promedio de la energía en baja frecuencia estima el valor de la ganancia estática del sistema.
- Determinación del ancho de banda: aplica un filtro de media móvil para eliminar el ruido existente y, mediante la determinación de ganancia estática, determina la frecuencia a la cual la respuesta del sistema sufre una atenuación de 3 dB según el criterio establecido en el Anexo I.

- SNR: utiliza la funciones potencia RMS y la frecuencia de corte de la señal inyectada para calcular la energía RMS de dos bandas, la banda en la que se ha inyectado señal y la banda libre de excitación, en la cual se puede observar el ruido del sistema. Este es el motivo por el cual la frecuencia máxima del multiseno usado para los experimentos se ha fijado en una frecuencia notoriamente inferior al límite del teorema del muestreo, dejando una región de ruido observable.

6.7 Utilidades adicionales

A continuación se enumeran una serie de herramientas que se han desarrollado paralelamente pero que, por su uso común en el resto de herramientas, se han incluido en un paquete denominado utilidades.

- Guardar como *Comma-Separated Values* o *csv*: permite exportar los datos medidos para su análisis externo o su almacenamiento.
- Calibración: permite realizar la calibración de las medidas.
- Filtro de media móvil: filtro de media, porque realiza una media de n muestras dentro de una ventana ajustable, y móvil porque se desplaza a lo largo de la variable independiente de la señal.
Se usa este tipo de filtro por la simplicidad y efectividad que supone, aunque se ve que en algún caso la acción de filtrado no es suficiente y su substitución podría mejorar la eficacia de los algoritmos.
- Filtro genérico: mediante el predictor implementado se pueden filtrar señales mediante la ecuación en diferencias de cualquier filtro o sistema de cualquier orden.

7 Estudio económico

El desglose económico de este proyecto se analiza por el material usado y no se tiene en cuenta el valor económico de cada elemento:

todo el equipamiento usado durante y para el proyecto lo ha proporcionado Ingenia.

La horas dedicadas son 880.

Entre este equipamiento (citado en la Sección 2.2) se incluye:

- **Nanotec DB42M03.**
- **Faulhaber IE3-1024**
- Controlador **Pluto**
- Controlador **EVEREST** x2: durante la experimentación, dos controladores resultaron dañados de forma permanente.
- Multímetro **DVM4000.**
- Ordenador personal
- Sistema informático de gestión de versiones y control de incidencias.
Se usa **GIT** junto con el software **SourceTree**, ambos gratuitos.
- **MATLAB**, versión educativa. Se usa brevemente al inicio, cuando las herramientas no estaban desarrolladas, no se considera necesario para el desarrollo del proyecto.
- **Minitab**, versión educativa. Herramienta de análisis estadístico.
- Excel, usado para el procesado preliminar de datos y la importación a Minitab.
- **Latex**: herramienta de redacción de texto, gratuito.
- **PyCharm**: entorno de programación y diagnosis de código **Python**, gratuito.
- Acceso a las instalaciones de Ingenia: laboratorio y oficinas.
- Muchas horas de dedicación.

Como beneficio, se plantea que las mejoras implementadas reducen el tiempo que los empleados tienen que dedicar a desarrollar pruebas específicas para la experimentación y validación del desarrollo de producto.

La verificación de los productos se realiza generalmente mediante pruebas similares a las aquí realizadas, las herramientas desarrolladas aumentan de forma potencial la capacidad de realizar experimentos estadísticos a gran escala con múltiples variaciones de parámetros que pueden significar una mejoría de los análisis muy significativa respecto al procedimiento actual aplicado en **Ingenia**.

Igualmente, cuando el algoritmo esté completamente desarrollado, puede suponer un aumento potencial del nicho de mercado actual, debido a la facilidad de implementación por parte de usuarios con menor capacidad de diseño de sistemas de control.

El ahorro de tiempo que ha supuesto la posibilidad de automatizar la experimentación es incalculable, sin esto no hubiera sido posible realizar el análisis estadístico de la dimensión que se ha considerado en el proyecto.

7 Estudio de impacto ambiental

El proyecto se desarrolla partiendo de una línea de productos que la empresa ya desarrolla por lo que no se va a entrar en la evaluación del impacto que supone la existencia de estos productos.

Gran parte del trabajo se realiza en una plataforma informática, que ya disponía previamente a iniciar el proyecto. El gasto eléctrico se estima en 60% del tiempo dedicado al proyecto.

Por otro lado, la gran mayoría de análisis se realizan en papel, gastando una cantidad significativa de papel no reciclado que, por otro lado, posteriormente se recicla.

El transporte usado para los desplazamientos necesarios se realiza en transporte público y/o bicicleta, por lo que no supone una contaminación excesiva.

Dos aparatos resultaron gravemente dañados, y debido a la tecnología usada para la fabricación y montaje de los mismos, la reparación no es viable. Su reciclaje no es en absoluto fácil ni inmediato, por lo que es el factor que mayor impacto ha generado.

Por lo demás, el desarrollo del proyecto permite un ligero aumento de eficiencia de los controladores, lo que a largo plazo puede compensar el gasto ambiental realizado.

8 Trabajos futuros

A continuación se listan todos los aspectos detectados a lo largo del proyecto que, o bien no se han terminado de solventar, o bien se han identificado como aspectos de mejora o desarrollo futuro:

1. Validación del algoritmo de identificación propuesto a nivel global (eléctrico, posición y control).
2. Implementación de las relaciones de auto-sintonizado del sistema de control.
Se ha estudiado y refinado el sistema previamente implementado, por lo que gran parte de este trabajo ya está hecho, será necesario por lo tanto revisar el planteamiento descrito en el Anexo IV y aplicar las relaciones desarrolladas.
3. Implementación de las herramientas de análisis en la interfaz de usuario(diagramas de bode, Nyquist, Nichols, respuesta temporal, predictor, etc)
4. Ampliación de los parámetros usados para fijar las especificaciones (margen de fase y ganancia, saturaciones, etc).
5. Estudiar cambio entre sensores y sus efectos sobre la identificación y auto-sintonizado.
6. Implementar la la identificación del retardo y la corrección de retardo en el algoritmo ARX.
7. Verificación de la influencia del manchado espectral en la señal multiseno y corregirla si procede (relacionado con la frecuencia máxima y la densidad de frecuencias estudiadas en este proyecto).
8. Estudiar la posibilidad de realizar la identificación y auto-sintoniza a tiempo real, en cada ciclo de reloj [3].
9. Estudiar el uso de un estimador de calidad más preciso.
10. Diseño e implementación de análisis factorial para la realización de las pruebas y determinación de interacción entre parámetros.

9 Conclusiones

Las conclusiones principales parten de una idea que ya tenía, y es que el control digital no es realmente óptimo a pesar de las grandes posibilidades que brinda.

Al margen de opiniones personales, se puede concluir que:

1. El algoritmo de identificación de la que disponía previamente **Ingenia** era bastante apropiado, no obstante había factores externos al algoritmo (como la inyección de corriente directa) que limitaban su eficacia.
Es cierto que muchas de las acciones aplicadas no tenían fundamento, como por ejemplo usar una señal optimizada para identificación frecuencial cuando el algoritmo usado es temporal.
De aquí también se concluye que la información redactada era bastante ambigua, deslocalizada y limitada en muchos aspectos, motivo por el cual en este estudio se ha decidido documentar debidamente todos y cada uno de los aspectos relacionados, especialmente para constituir una sólida base de cara a futuros estudios.
2. Los problemas analizados en los estudios previos se enfocaron correctamente.
El método usado para el diseño de los controles no era el más apropiado (cosa que aquí se ha afinado ligeramente) pero es mucho más inteligente solucionar el problema mediante una estructura de control alternativa que trabajando con la estructura clásica.
3. Los controladores han llegado a un nivel de sofisticación realmente admirable, el control automático ha evolucionado hasta un nivel de control interno de los sistemas que se ha conseguido alcanzar un control muy preciso de las variables de salida del sistema, aunque esto conlleva elevar de forma peligrosa la complejidad del sistema de control.
4. El control discreto es uno de los descubrimientos más importantes del siglo XXI, y si bien toda la teoría parece ofrecer una alternativa superior al control analógico, es cuestionable si el incremento de complejidad justifica el incremento de prestaciones. Es especialmente cuestionable cuando se tiene en cuenta la interacción con el usuario, o con el ingeniero responsable.
Ejemplificando esto, en el momento de comenzar el proyecto, pasé más de un mes familiarizándome con la estructura de los controladores, los nombres y formas de

acceso de los registros, la estructura de todos los programas, la existencia de constantes internas, enrutamientos ocultos y una gran deslocalización de la información para una persona recién iniciada en la empresa. No me puedo poner en el lugar de alguien que comienza a usar las librerías de bajo nivel de la empresa sin tener acceso a consulta con los desarrolladores de **Ingenia** como ha sido mi caso.

5. Como contrapunto, el estudio de las propiedades del dominio discreto y su interacción con dominios continuos me ha fascinado, especialmente porque refleja de una forma muy cercana el método científico y los factores que afectan a la experimentación. La base de realizar una medida discreta, analizarla y actuar en consecuencia es la base de todo lo que conocemos.

Una última aclaración acerca de lo mencionado en Sección 1.4 (notas sobre la evolución del proyecto): los objetivos iniciales, y que tanto **Ingenia** como Vicenç y yo pretendíamos cubrir, era la implementación completa del algoritmo, o más bien la traducción del algoritmo que actualmente tiene implementado **Ingenia**.

Cuando se detectaron ambigüedades en el funcionamiento del algoritmo se decidió aplicar un criterio de ingeniería civil: si los cimientos de un edificio son pésimos, no construyas encima de ellos.

Por esto mismo se dedicó casi por completo el tiempo de este proyecto a revisar y consolidar estos cimientos que constituyen la base de toda la construcción del algoritmo, a pesar de que esta ha supuesto no cumplir con muchos de los objetivos iniciales.

Por otro lado se ha tratado de documentar debidamente todo el contexto que envuelve al algoritmo, a pesar de que muchos conceptos se consideran básicos y triviales para alguien que tenga una base de ingeniería de sistemas y control.

Esta documentación se refleja en los anexos, que aún no están terminados, y que se prevé revisar y cerrar en un plazo máximo de un año.

Tras la finalización de los anexos, estos serán expuestos con carácter de dominio público, no comercial y con posibilidad de obra derivada para su utilización por parte de los empleados de **Ingenia**, usuarios de los productos de la empresa y cualquier otra persona que pueda beneficiarse del conocimiento que se ha intentado reflejar de forma rigurosa y coherente en los anexos.

Esto justifica en parte la estructura poco habitual de la memoria de este proyecto.

Bibliografía

- [1] Pablo Segovia Castillo. *Identificació i control d'un motor de tipus voice coil*. PhD thesis, ETSEIB, UPC, Abril 2015.
- [2] Texas Instruments. *Field Orientated Control of 3-phase AC-Motors*.
- [3] Gianluca Zito Ioan Doré Landau. *Digital Control Systems*. Communications and Control Engineering. Springer-Verlag London, 2006.
- [4] Juan J. Quiroz-Omaña y Deyanira Bautista-Arias José A. Becerra-Vargas, Francisco E. Moreno-García. Estimación de parámetros y modelo de caja negra de un motor cd sin escobillas estimación de parámetros y modelo de caja negra de un motor cd sin escobillas. *Tecno Lógicas*, 17(33):55–64, Julio-Diciembre 2014.
- [5] Benjamin C Kuo. *Sistemas de control automático*. Pearson Educación, 1996.
- [6] Qian Jixin Liu Bo, Zhao Jun. *Design and Analysis of Test Signals for System Identification*. Institute of System Engineering, National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhoy P.R. China.
- [7] José Rosales Ortega. *Sistemas Dinámicos Elementales*. Escuela de Matemática, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [8] Theodore P. Pavlic. *Rotary Electrodynamics of a DC Motor: Motor as Mechanical Capacitor*, 2007-2009.
- [9] Darshan Ramasubramanian. *Identification and control of DC motors*. PhD thesis, ETSEIB, UPC, September 2016.
- [10] Johan Schoukens Rik Pintelon. *System identification: a frequency domain approach*. IEEE Press, 2012.
- [11] G. G. Zhu Z. Ren. Pseudo-random binary sequence closed-loop system identification error with integration control. *Mechanical Engineering, Michigan State University*, (877), May 2009.



Agradecimientos

Llegados a esta sección, podría escribir toda una nueva memoria solo con el proceso de investigación, descubrimiento y desarrollo del proyecto, intentaré, así, ser medido en cuanto a los agradecimientos tratando de ser lo suficientemente preciso al mencionar la aportación de cada una de las personas que me han acompañado a lo largo de este momento.

No puede ser de otra manera si no reservo estas primeras líneas a las personas que sin duda son las que me han brindado la posibilidad de llegar hasta aquí, que es toda mi familia, aunque en especial mis padres y mi hermano, que desde siempre me han enseñado a hacer las cosas con ilusión y con pasión y que sin duda ha sido la clave en mi vida tanto personal como profesional.

Partiendo de una base muy potente, tuve la suerte de estudiar en una de las mejor consideradas universidades del país, donde grandes maestros se han esforzado cada día por transmitir todos sus conocimientos de la ciencia y la ingeniería, así como su pasión por el conocimiento y la investigación.

Cito, por orden cronológico en que los conocí, algunos de los profesores de las asignaturas que mayor utilidad han tenido para este proyecto:

- Josep Ferrer, desde las durísimas clases de álgebra y cálculo II, consiguió que me interesara profundamente por las matemáticas y, muy en especial, por los sistemas dinámicos y el increíble orden que se esconde detrás del caos.

- Pere Caminal, pues desde mi más joven pasión por la ingeniería, mi área de mayor interés era, sin saberlo, los sistemas dinámicos. Y en la asignatura dinámica de sistemas consiguió enseñarme la base que se esconde detrás de estos, y que ha sido el pilar fundamental de este estudio.

- Tomás Lázaro, después de haber sobrevivido a los primeros años de carrera, y ya que tenía el ritmo cogido, nada mejor que un intenso curso sobre ecuaciones diferenciales desde una perspectiva práctica muy amenos.

- Pere Grima, porque si bien la estadística me ha servido más para los juegos de azar, es muy importante tener una visión realista del comportamiento real y aleatorio de los

procesos y saber como evaluarlo.

- Samuel Galcerán, que no ha querido ayudarme con la realización de este proyecto pero que me enseñó todo sobre el funcionamiento de motores eléctricos.

- Josep Sempau, todo un ejemplo de investigador y excelente divulgador de conocimiento científico. Aprendí de el como realizar proyectos científicos y de ingeniería.

El hecho de que este documento este redactado tratando de seguir una rigurosa presentación, nomenclatura y orden, además de estar redactado en LaTeX, es obra suya.

- Josep Figueras, si bien su visión de como gestionar los proyectos era un poco distinta a la habitual, su capacidad para comunicar el fruto de la experiencia de un gran ingeniero me ha permitido llevar este año diversos proyectos por cuenta propia, incluyendo este.

Una mención breve pero no menos importante a dos grandes maestros no presenciales que sigo desde hace años:

- Pablo Fernandez-Cid, doctor en ingeniería de telecomunicaciones, miembro activo de la comunidad *Hispasonic* de músicos e ingenieros de sonido. Sus publicaciones de divulgación científica sobre temas de acústica, procesado de señales y una amplia colección de artículos gratuitos han constituido la base muy importante de mi aprendizaje y desarrollo en el mundo de la ingeniería. www.cicloquintas.com

- Pepe Ferrer, conocido como uno de los mejores ingenieros de sistemas de sonido del territorio español, publica de forma frecuente todo su conocimiento de forma gratuita en el blog EducaSound. www.educasound.com

Por último, pero no menos importante, agradecer a todas las personas que han participado directamente en este proyecto:

- Vicenç Puig, si el nada de lo que se ha expuesto en este documento hubiera llegado hasta aquí. Me ha ayudado enormemente a lo largo del proyecto, dedicando todo el tiempo necesario a que comprendiera conceptos y tomara las decisiones adecuadas en cada momento.

- Joaquim Blesa, porque aún llevando una parte paralela de este proyecto y un calendario muy apretado no tiene inconveniente en hechar un cable cuando es necesario.

y en un gran bloque, porque si parara a describir todo lo que han aportado podría escribir una novela, todo el equipo de Ingenia, Roger, Francesc, Oriol, Hector, Ernest, ambos Alberts, Javi, Toni, Josep, Marc, Irene, Salva, Raul, Xavi, Gabriela, ambos Joans, Arnau, Ricard, Lupe, Rodrigo y Jordi.